

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

(повна назва інституту/факультету)

Автоматизації експериментальних досліджень

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК 681.2.089

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Туз Ю. М.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і назва спеціальності)

на тему: «Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування
гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості»

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ВА-81мп
(шифр групи)

_____ Скрипковська Марія Геннадіївна _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник доцент кафедри АЕД, к.т.н., доцент

_____ Добролюбова М.В. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант Розробка стартап-проекту

(назва розділу)

_____ д.е.н., доцент Бояринова К.О. _____

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент доцент кафедри ІВТ, к.т.н., доцент Павлишин М.М. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) приладобудівний
(повна назва)

Кафедра автоматизації експериментальних досліджень
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ю.М. Туз
(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Скрипковської Марії Геннадіївни**
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості», науковий керівник дисертації Добролюбова Марина Валеріївна, к.т.н., доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2019 р. №3848-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес калібрування мікромеханічних гіроскопічних перетворювачів кутової швидкості

4. Предмет дослідження вплив допоміжних технічних засобів системи та алгоритму обробки даних на точність процесу калібрування

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _____

1) Розглянути метод калібрування гіроскопічних перетворювачів кутової швидкості (ПКШ).

2) Проаналізувати існуючі системи для калібрування мікромеханічних гіроскопічних ПКШ.

3) Розробити структуру інформаційно-вимірювальної системи температурного калібрування гіроскопічних ПКШ.

4) Розробити програмне забезпечення для проведення експериментів при розробці системи та її користувачів.

5) Провести експериментальні дослідження

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу Рисунки із зображенням апаратної та програмної частин розробленої системи температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості

7. Орієнтовний перелік публікацій 1) Скрипковська М. Г. Програмне забезпечення системи стабілізації частоти обертання для стенду температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості / М.Г. Скрипковська, М.В. Добролюбова // «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2019): збірник тез доповідей (ел.), 29 – 31 жовтня 2019 р., м. Вінниця: ВНТУ, 2019. – С. 100-101.

2) Скрипковська М. Г. Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості / М.Г. Скрипковська, М.В. Добролюбова // “ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ” Збірник праць XV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених , 10-11 грудня 2018 р. К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – 546 с.

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка стартап-проекту	Бояринова К.О.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Розгляд методу калібрування гіроскопічних ПКШ	03.09.2019 – 14.09.2019	
2	Аналіз існуючих систем для калібрування мікромеханічних гіроскопічних ПКШ	14.09.2019 – 29.09.2019	
3	Розробка структури інформаційно-вимірювальної системи температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних ПКШ	29.09.2019 – 10.10.2019	
4	Розробка програмного забезпечення для проведення експериментів при розробці системи та її користувачів	10.10.2019 – 05.11.2019	
5	Проведення експериментальних досліджень	05.11.2019 – 01.12.2019	

Студент

(підпис)

М.Г. Скрипковська

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

М.В. Добролюбова

(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему «Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості» розглядає питання температурного калібрування перетворювачів кутової швидкості (ПКШ) для забезпечення визначення коефіцієнтів його моделі вихідних сигналів.

Визначено структуру системи та розроблено програмне забезпечення ІВС.

Проведено аналіз вихідних сигналів ПКШ, визначено метод їх обробки, який призведе до підвищення точності калібрування.

Описані особливості потоків інформації ІВС від MEMS-гіроскопів у складі ІНС до ПК.

Основні положення і висновки дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 5-й Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» та XV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні”.

Дисертація викладена на 93 сторінках машинописного тексту, ілюструється 21 рисунками та 27 таблицями, складається зі вступу, 5 розділів, висновку, переліку посилань з 32 найменувань.

ГІРОСКОП, ІНС, MEMS, КУТОВА ШВИДКІСТЬ, ВИМІРЮВАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, КАЛІБРУВАННЯ.

ABSTRACT

Master's dissertation about "Information-measuring system for temperature calibration of gyro micromechanical angular rate sensors" deals with the issue of temperature calibration of angular rate sensors (ARS) to ensure the determination of the coefficients of its output signal model.

The structure of the information-measuring system (IMS) is defined and the software is developed.

The analysis of the output signals of the ARS signals is performed, the method of their processing is determined, which will lead to the improvement of the calibration accuracy.

Features of IMS information flows from MEMS gyroscopes within the INS to PC are described.

The main thesis and conclusions of the dissertation were reported and discussed at the 5th International Scientific Conference "Measurement, Control and Diagnostics in Technical Systems" and the 15th All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists "Efficiency of Engineering Solutions in Instrumentation".

The dissertation is presented on 93 pages of typewritten text, is illustrated by 21 figures and 27 tables, consists of introduction, 5 sections, conclusion, a list of references of 32 names.

GYROSCOPE, INS, MEMS, ANGLE SPEED, MEASUREMENT, MICROCONTROLLER, CALIBRATION.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП	10
1 ОГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	13
1.1 Калібрування гіроскопів	13
1.2 Температурне калібрування гіроскопів	15
1.3 Калібрувальні стенди	16
1.3.1 Одновісні стенди Acutronic	16
1.3.1.1 1-осьовий поворотний стіл моделі simexONE Acutronic (Швейцарія)	17
1.3.1.2 Система управління SimexTM	18
1.3.1.3 Контролер руху ACUTROL®3000e	19
1.3.2 Одновісні стенди ACTIDYN	20
1.3.2.1 Серія RT 1100	20
1.3.2.2 Серія ST 1100	21
1.3.2.3 Контролер AXIDYN ND	22
1.3.3 Одновісні стенди Motion Dynamic	23
1.4 Висновки до розділу 1	25
2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ	26
2.1 Структурна схема IBC	26
2.2 Компоненти IBC	28
2.2.1. Мікроконтролер TMS-320F28335	28
2.2.2 Інтерфейс UART	30
2.2.3 Шина USB	31
2.2.4 USB hub	31

2.2.5 ЦАП	32
2.2.6 Двигун ДБМ 105-0,6-0,5-3	32
2.2.7 Енкодер E40H8-3600-3-N-5 Autonics	32
2.3 Зовнішній вигляд ІВС	32
2.4 Висновки до розділу 2	33
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	34
3.1 Програмне забезпечення мікроконтролера	34
3.1.1 Code Composer Studio	34
3.1.2 Пропорційно-інтегральний регулятор	35
3.1.3 Алгоритми МК	35
3.2 Програми з інтерфейсом користувача	41
3.2.1 Qt	41
3.2.2 Програма для налаштування ДТЗ	41
3.2.3 Програма для калібрування	42
3.3 Висновки до розділу 3	44
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	45
4.1 Теоретичні відомості	45
4.2 Експериментальні дослідження ПКШ	41
4.3 Висновки до розділу 4	52
5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ	53
5.1 Опис ідеї проекту	53
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту	57
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту	59
5.4 Розробка ринкової стратегії проекту	67
5.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту	70
5.6 Висновки до розділу 5	73

ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	76
ДОДАТОК А ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ	80
ДОДАТОК Б ПУБЛІКАЦІЇ	83

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

MEMS (МЕМС) – мікроелектромеханічні системи

ІНС – інерційна навігаційна система

ПКШ – перетворювач кутової швидкості

ММГ – мікромеханічні гіроскопи

ІВС – інформаційно-вимірювальна система

ІВМ – інерційний вимірювальний модуль

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ОДГ – оптична ділильна головка

ПК – персональний комп'ютер

ВПТ – вимірювальний перетворювач температури

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

USB – universal serial bus

UART – universal asynchronous receiver/transmitter

СЦП – спектральна щільність потужності

СКВ – середньоквадратичне відхилення

ДТЗ – допоміжний технічний засіб

ВСТУП

Актуальність теми. Кутова швидкість – величина, за допомогою якої можна визначати положення об’єктів у просторі. Вимірювання кутової швидкості об’єктів в інерційних навігаційних системах (ІНС) здійснюється гіроскопічними перетворювачами кутової швидкості (ПКШ). Такі перетворювачі використовуються у системах орієнтації, навігації та керування, які наявні у складі авіаційної та космічної техніки, транспорту (автомобілі), гаджетах (мобільні телефони) та стабілізованих платформах. У наш час в якості ПКШ широко використовуються мікромеханічні (MEMS) гіроскопи (ММГ), завдяки малим габаритам та відносно низькій вартості вони застосовуються у навігаційних системах як керованих, так і безпілотних автомобілів, автопілотах безпілотних літальних апаратів, системах стабілізації зображення камер.

Для забезпечення точності вимірювань ПКШ необхідно здійснювати їх випробування та калібрування перед встановленням у ІНС або у їх складі. Для цього використовуються стенди – лабораторне устаткування, на якому здійснюються випробування об’єктів в умовах впливу штучно створених зовнішніх факторів. Завдяки цьому можливо оцінити роботу перетворювачів при впливі різноманітних типів та величин зовнішніх факторів. Для ПКШ такими факторами є безпосередньо кутова швидкість обертання об’єкту, на який встановлено ПКШ, та температура навколишнього середовища. Тому калібрування здійснюється у декілька етапів та на різних температурах. Розробка інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для автоматичного отримання, обробки, зберігання кількісної інформації від досліджуваних об’єктів (ПКШ) сприяє оптимізації процесу калібрування ПКШ.

Таким чином, актуальність теми дисертації обумовлена:

- сьогоденним розвитком ринку ІНС, який формує попит на системи для калібрування їх первинних перетворювачів;

- необхідністю забезпечити точність визначення коефіцієнтів моделі вимірювання ПКШ у широкому температурному діапазоні;
- необхідністю зменшення часу на процедуру калібрування;

Метою дисертації є дослідження процесу калібрування ПКШ, визначення структури ІВС, розробка програмного забезпечення ІВС та її допоміжних технічних засобів (ДТЗ), дослідження впливу ДТЗ та алгоритму обробки даних на точність процесу калібрування, вдосконалення алгоритму обробки даних для оптимізації цього процесу. Це дозволить підвищити точність навігаційних та інших систем, у складі яких є ПКШ. При застосуванні ІВС на виробництві можна буде забезпечити зручне проведення випробувань зі зниженням вартості обладнання та часу на проведення досліджень.

Для досягнення поставленої цілі, були вирішені наступні завдання:

- ознайомлення з теоретичними аспектами методу калібрування ПКШ;
- проаналізовано існуючі системи для калібрування мікромеханічних гіроскопічних ПКШ;
- вивчено документацію, креслення, принципові схеми компонентів ІВС;
- розроблено структурну схему ІВС;
- розроблено програмне забезпечення;
- проведено експериментальні дослідження.

Об'єкт дослідження – процес калібрування мікромеханічних гіроскопічних перетворювачів кутової швидкості.

Предмет дослідження – вплив допоміжних технічних засобів системи та алгоритму обробки даних на точність процесу калібрування.

Методи дослідження. При вирішенні поставлених задач використані методи статистичного аналізу, теорії систем автоматичного керування,

теорії точності вимірювальних пристроїв, теорії оптимізації і принципи моделювання.

Практичне значення отриманих результатів. За результатами тестування розробленої системи вдалося обрати ефективний алгоритм обробки її вихідних даних, що призводить до підвищення точності калібрування перетворювачів кутової швидкості, а також зменшення тривалість часу, необхідного для калібрування. Отримані результати впроваджено у ТОВ «Гіротех» і використовуються під час виконання робіт з калібрування ПКШ ІНС.

Апробація результатів роботи. Основні положення і висновки дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 5-й Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» та XV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні”.

Особистий внесок магістранта – створено структурну схему ІВС для температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних ПКШ, розроблено програмне забезпечення (ПЗ) для мікроконтролера ДТЗ, розроблено ПЗ для персонального комп’ютеру (ПК) для налагодження роботи ДТЗ, вдосконалено ПЗ ПК ІВС, запропоновано нові алгоритми обробки вихідних даних.

Новизна та наукова цінність результатів магістерської дисертації полягає у створенні спеціалізованої для калібрування MEMS-ПКШ ІВС температурного калібрування з використанням сучасних апаратних і програмних засобів. Результати будуть використані для досліджень і розробки перспективних напрямків розвитку і модернізації подібних систем.

Галузь застосування – розроблена система є актуальною для розробників у галузях приладобудування, машинобудування, авіабудування.

1 ОГЛЯД АНАЛОГІЧНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

1.1 Калібрування гіроскопів

Калібрування гіроскопів складається з двох етапів [1].

На першому етапі визначаються коефіцієнти матриці масштабних коефіцієнтів та перехресних зв'язків моделі вихідних сигналів шляхом задання ряду значень кутових швидкостей обертання. Для цього інерційний вимірювальний модуль (ІВМ) ІНС, у складі якого є ПКШ, встановлюють на спеціальний поворотний стіл, вісь якого повинна бути виставлена вертикально. Точність задання та стабілізації кутової швидкості обертання поворотних столів при калібруванні гіроскопів повинна бути не гірша, ніж точність гіроскопів, які калібруються.

При калібруванні на поворотному столі задають декілька значень кутової швидкості обертання у необхідному діапазоні вимірювання гіроскопів (ПКШ) для більш точної побудови статичної характеристики. Наприклад, для робочого діапазону ПКШ $\pm 300^\circ/\text{с}$ зручно задати $N=7$ значень кутової швидкості з кроком $100^\circ/\text{с}$. В будь якому випадку повинно бути задано дві або більше кутових швидкостей по кожній осі. При виконанні кожного вимірювання під час калібрування вихідні сигнали гіроскопів осереднюються для суттєвого зменшення шумів вимірювань.

На другому етапі у фіксованих положеннях, які задаються за допомогою оптичної ділильної головки (ОДГ) ІВМ залишається нерухомою відносно Землі, прискорення по осям задаються у вигляді проекції вектора сили тяжіння g .

Модель вихідних сигналів гіроскопів у матричній формі має вигляд:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x} \\ U_{\omega y} \\ U_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{\omega x 0}^* \\ U_{\omega y 0}^* \\ U_{\omega z 0}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_{\omega x} \\ n_{\omega y} \\ n_{\omega z} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Де

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x 0}^* \\ U_{\omega y 0}^* \\ U_{\omega z 0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\omega x 0} \\ U_{\omega y 0} \\ U_{\omega z 0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

$U_{\omega i}$ – значення вихідних сигналів гіроскопів, r_{11}, r_{22}, r_{33} – масштабні коефіцієнти, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – значення проекції кутової швидкості на вісь чутливості ПКШ, $n_{\omega x}, n_{\omega y}, n_{\omega z}$ – шуми вимірювання, $U_{\omega i 0}^*$ – зміщення нуля без розділення на залежні та незалежні від прискорення складові, $U_{\omega i 0}$ – незалежне від прискорення зміщення нуля, b_{ij} – коефіцієнти чутливості до прискорень, a_i – проекція прискорення на вісь чутливості гіроскопів. Так як значення вихідних сигналів на кожному вимірюванні усереднюються для суттєвого зменшення впливу шумів, тому ними можна знехтувати:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x} \\ U_{\omega y} \\ U_{\omega z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{\omega x 0}^* \\ U_{\omega y 0}^* \\ U_{\omega z 0}^* \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

В подальшому зручно об'єднати 12 шуканих коефіцієнтів у одну матрицю:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega xi} \\ U_{\omega yi} \\ U_{\omega zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & U_{\omega x 0}^* \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & U_{\omega y 0}^* \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & U_{\omega z 0}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

При калібруванні обертання задається навколо кожної вісі окремо, спочатку розглянемо обертання навколо осі X, тоді кутові швидкості по осям y та z дорівнюють нулю та рівняння 1.4 можна спростити:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega xi} \\ U_{\omega yi} \\ U_{\omega zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & U_{\omega x 0}^* \\ r_{21} & U_{\omega y 0}^* \\ r_{31} & U_{\omega z 0}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_x \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

Всього під час калібрування задається N значень кутової швидкості, в результаті чого отримаємо N вимірювань вихідних сигналів, які можна об'єднати в одне матричне рівняння:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x1} \dots U_{\omega xN} \\ U_{\omega y1} \dots U_{\omega yN} \\ U_{\omega z1} \dots U_{\omega zN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} U_{\omega x0}^* \\ r_{21} U_{\omega y0}^* \\ r_{31} U_{\omega z0}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{x1} \dots \omega_{xN} \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Аналогічно для осей Y та Z:

$$\begin{bmatrix} U_{\omega xN+1} \dots U_{\omega x2N} \\ U_{\omega yN+1} \dots U_{\omega y2N} \\ U_{\omega zN+1} \dots U_{\omega z2N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{12} U_{\omega x0}^* \\ r_{22} U_{\omega y0}^* \\ r_{32} U_{\omega z0}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{y1} \dots \omega_{yN} \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

$$\begin{bmatrix} U_{\omega x2N+1} \dots U_{\omega x3N} \\ U_{\omega y2N+1} \dots U_{\omega y3N} \\ U_{\omega z2N+1} \dots U_{\omega z3N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{13} U_{\omega x0}^* \\ r_{23} U_{\omega y0}^* \\ r_{33} U_{\omega z0}^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{z1} \dots \omega_{zN} \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Рівняння (1.6)-(1.8) є лінійними рівняннями виду $B = X \cdot A$, рішення такого рівняння має вигляд:

$$X = B \cdot A^T \cdot (A \cdot A^T)^{-1} \quad (1.9)$$

Застосувавши (1.9) до (1.6)-(1.8) визначимо шукані параметри вихідних сигналів ПКШ:

$$\begin{bmatrix} r_{11} U_{\omega x0}^* \\ r_{21} U_{\omega y0}^* \\ r_{31} U_{\omega z0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\omega x1} \dots U_{\omega xN} \\ U_{\omega y1} \dots U_{\omega yN} \\ U_{\omega z1} \dots U_{\omega zN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{x1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{xN} & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \omega_{x1} \dots \omega_{xN} \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{x1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{xN} & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (1.13)$$

$$\begin{bmatrix} r_{12} U_{\omega x0}^* \\ r_{22} U_{\omega y0}^* \\ r_{32} U_{\omega z0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\omega xN+1} \dots U_{\omega x2N} \\ U_{\omega yN+1} \dots U_{\omega y2N} \\ U_{\omega zN+1} \dots U_{\omega z2N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{y1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{yN} & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \omega_{y1} \dots \omega_{yN} \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{y1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{yN} & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (1.14)$$

$$\begin{bmatrix} r_{13} U_{\omega x0}^* \\ r_{23} U_{\omega y0}^* \\ r_{33} U_{\omega z0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\omega x2N+1} \dots U_{\omega x3N} \\ U_{\omega y2N+1} \dots U_{\omega y3N} \\ U_{\omega z2N+1} \dots U_{\omega z3N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{z1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{zN} & 1 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \omega_{z1} \dots \omega_{zN} \\ 1 \dots 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_{z1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{zN} & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \quad (1.15)$$

1.2 Температурне калібрування гіроскопів

Температурні залежності параметрів моделей вихідних сигналів мають складний характер, так як визначаються багатьма факторами (матеріали, конструкція, способи з'єднання елементів і т.д.). Детальне дослідження цих залежностей необхідне для пошуку шляхів зниження температурної чутливості параметрів, забезпечення стабільності цієї

чутливості для можливості її компенсації. При використанні вихідних сигналів інерційних вимірювачів у приладах та системах, температурні залежності зазвичай апроксимують нескладними функціями від температури. Найчастіше використовують лінійну, кусково-лінійну та поліноміальну апроксимації.

Для цього калібрування гіроскопів проводять у термокамерах.

Таким чином, згідно методики калібрування гіроскопів, для її здійснення необхідні поворотний стіл та ОДГ, а для температурного калібрування вони мають бути розміщені в термокамері.

1.3 Калібрувальні стенди

1.3.1 Одновісні стенди Acutronic

Одновісні стенди фірми **Acutronic** це точні системи, призначені для випробувань датчиків, таких як гіроскопи, акселерометри, інерціальні платформи при впливі на них кутової швидкості, прискорення і повороту на фіксований кут [2].

Всі стенди мають високу надійність завдяки застосуванню високоточного управління електродвигунами з безпосереднім приводом та ефективних підсилювачів потужності. Зовнішній вигляд стендів та основні характеристики зображені на рисунку 1.1.

Model	AC11200	area™ONE	AC1125
			
Table top diameter	250–350 mm	300–650 mm	300–900 mm
Payload (max)	10 kg (20 kg)	20 kg (40 kg)	100 kg
Payload inertia	0.1 kg/m ²	0.5 kg/m ²	1 kg/m ²
Rate accuracy (over 360°)	0.001%	0.001%	0.0001%
Position accuracy	+/- 15 arc sec	+/- 10 arc sec standard +/- 2 arc sec optional	< 1 arc sec RSS
Position transducer	relative optical encoder with homing	absolute optical encoder	Inductosyn® and Resolver
Controller	industrial	industrial	ACUTROL®3000

Рисунок 1.1 – Стенди Acutronic

У комплект поставки входять сполучні кабелі, електричні роз'єми для інтерфейсу користувача, два комплекти документації та інструкція з експлуатації мовою. Система ACUTROL® 3000 управляє роботою стендів.

1.3.1.1 1-осьовий поворотний стіл моделі simexONE Acutronic (Швейцарія)

Стандартний поворотний стіл simexONE [3] з прецизійним датчиком положення має три варіанти виконання планшайби і два варіанти висоти підставки на вибір [4]. Стандартний блок струмознімальних кілець з 62 лініями для потреб замовника також є в запасі. Для розширення можливостей випробувань доступні два варіанти температурних камер з механічним охолодженням. Також можливе виготовлення під замовлення з використанням частин на вибір.

Всі випробувальні столи мають високоточну і надійну систему прямого приводу з замкнутим контуром, серво-контролер і підсилювач потужності.

Технічні характеристики поворотного столу наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики поворотного столу simexOne

Основні розміри	
Діаметр планшайби	280 / 450 / 540 (мм)
Матеріал планшайби	Анодований алюміній
Висота планшайби	коротка версія: 530 мм довга версія: 876 мм
Орієнтація осі	вертикальна
Контролер simex™	19", (3х4,44см)
Маса	17 кг
Розміри	135в х 450ш х 500г (мм)
Живлення	230В~, одна фаза, +/-10%, 50-60Гц, 2.4кВА 10 А
Випробуваний об'єкт	
Корисне навантаження, номінальна вага (макс.)	22кг (44кг)
Механічні/Статичні характеристики	

Биття	<5 кут. с.		
Кутова свобода	необмежена		
Точність позиціонування	+/-2 кут. с.		
Динамічні параметри			
Діапазон позицій	0° - 360°		
Діапазон кут. швидкостей	+/-1'800°/с		
Роздільна здатність кут. швидкості	0.0001°/с		
Стабільність кут. швидкості на 360°	0.001%		
Прискорення без навантаження з навантаженням 0.25кг*м2 з навантаженням 0.50кг*м2	280мм планшайба 35'000°/с2 7'500°/ с2 4'000°/ с2	450мм планшайба 10'000°/ с2 5'000°/ с2 3'000°/ с2	540мм планшайба 2'500°/ с2 2'000°/ с2 1'500°/ с2
Температурна камера			
Температурна камера	Voetsch VT 7004 (планшайба 280)	Voetsch VTV 7021-5/S (планшайба 450, планшайба 540)	
Діапазон температур	-50°C; +125°C	-50°C; +125°C	
Об'єм камери	37л	200л	
Система охолодження	механічна	механічна	

1.3.1.2 Система управління Simex™

Розміщений в 19" стійці і керований по шині CANopen Bus, сучасний контролер має 2 аналогових входи і 2 аналогових виходи, а також такі додаткові функції, як корекційні таблиці, завдання команд по кутовий швидкості і прискорення з попередженням, корекція нерівномірності моменту і компенсація тертя [4].

Пакет програм, включаючи графічний інтерфейс користувача ACUTROL®3000, керуючі програми і програмні модулі для USB-CAN адаптерів поставляється на диску CD-ROM.

Режими роботи:

- прецизійне абсолютне позиціонування (профілювання руху з обмеженнями по кутовій швидкості і прискоренню);
- прецизійна кутова швидкість без відхилень, точне миттєве значення кутової швидкості, стабільність кутової швидкості $0.001^\circ/\text{с}$ на 360° (профілювання руху з обмеженням щодо прискорення);
- генератор випробувань (синусоїдальний рух, прямокутний рух, випадковий).

1.3.1.3 Контролер руху ACUTROL®3000e

Поворотні столи інтегровані з системою управління ACUTROL®3000 [5]. Зовнішній вигляд системи зображено на рисунку 1.2. Система ACUTROL® має сенсорний екран і може бути налаштована під специфічні вимоги користувача. Конструктивно встановлюється в 19" стійку управління.



Рисунок 1.2 – Контролер руху ACUTROL®3000e

Система ACUTROL®3000 – це цифровий контролер, що складається з мікропроцесора, дискретної логіки і системи аналогового і цифрового вводу/виводу сигналів, об'єднаних в єдину конструкцію. Управління позиціонуванням, швидкістю і прискоренням проводиться в ручному режимі або через інтерфейси IEEE-488, Ethernet (TCP/IP). Як датчики

положення застосовуються 720-полюсний Inductosyn і 2-полюсний Resolver. Дані про швидкість обертання обчислюються з даних про кутове положення. Контролер сумісний з мовою програмування ACUTROL® Control Language (ACL). Структурна схема контролеру зображена на рисунку 1.3.

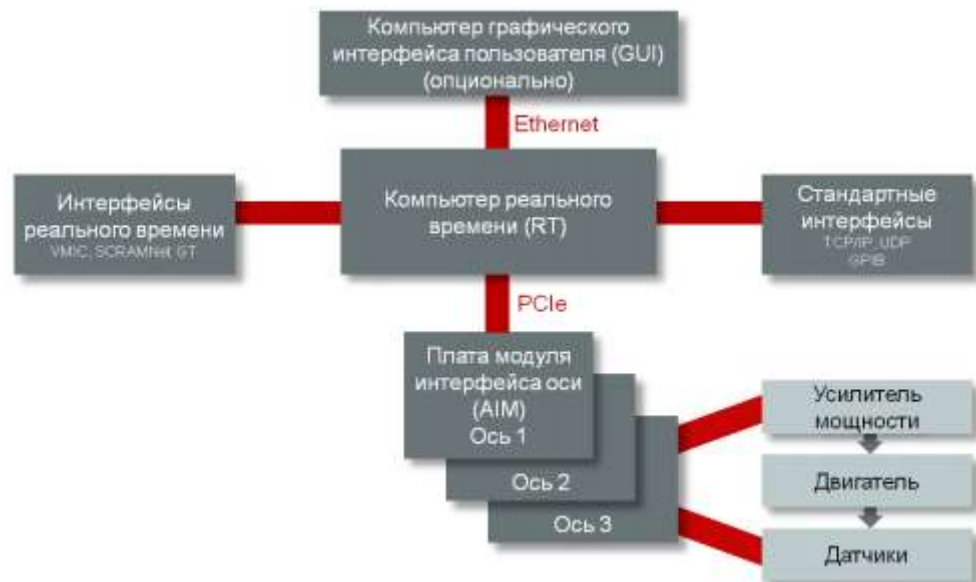


Рисунок 1.3 – Структурна схема ACUTROL®3000e

1.3.2 Одновісні стенди ACTIDYN

Безщиткова конструкція двигунів стендів ACTIDYN забезпечує велику ширину смуги пропускання і високий динамічний відгук, мінімізуючи при цьому вартість технічного обслуговування [6]. Залежно від режиму, одновісні столи обертання компанії ACTIDYN дозволяють виконувати наступне:

- обертання на наднизькій швидкості (1град / год і нижче);
- обертання на надвисокій швидкості (до 10 000 град / с і більше);
- абсолютне позиціонування з точністю до 0,1 кут. с;
- індексування положення осей;
- поєднані температурні випробування.

1.3.2.1 Серія RT 1100

Зовнішній вигляд стенду серії RT1100 наведено на рисунку 1.4, його основні технічні характеристики – у таблиці 1.2.



Рисунок 1.4 Стенд ACTIDYN серії RT 1100

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики стенду ACTIDYN серії RT 1100

	RT 1112 P	RT 1112 V
Маса навантаження (макс.), кг	12	12
Діаметр навантаження, мм	220	220
Висота навантаження, мм	300	300
Діаметр стола, мм	250	250
Точність позиціонування, кут.с.	± 7	N/A
Діапазон швидкостей обертання, °/с	± 2700	± 2700
Полоса пропускання, Гц	>100	>100

1.3.2.2 Серія ST 1100

Зовнішній вигляд стенду серії ST1100 наведено на рисунку 1.5, його основні технічні характеристики – у таблиці 1.3.



Рисунок 1.5 Стенд ACTIDYN серії RT 1100

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики стенду ACTIDYN серії RT 1100

	ST 1112	ST 1114	ST 1144	ST 1194	ST 1196
Маса навантаження (макс.), кг	40	40 (70)	40 (70)	70 (100)	70 (100)
Діаметр навантаження, мм	200	400	400	400	600
Висота навантаження, мм	200	540	540	540	540
Діаметр столу, мм	200	400	400	400	600
Точність, кут.с.	± 1	± 1	± 1	± 1	± 1
Діапазон швидкостей, °/с	± 2000	± 2000	± 2000	± 2000	± 2000
Полоса пропускання, Гц	> 50	> 50	> 50	> 50	> 50

1.3.2.3 Контролер AXIDYN ND

AXIDYN ND - це гнучкий цифровий контролер, призначений для одно- або багатоосьових стендів руху [7]. Висока точність у поєднанні з високою динамічною реакцією досягається за допомогою використання перетворювачів резольвера та індуктосина.

Приладом можна керувати дистанційно за допомогою стандартних інтерфейсів, таких як RS232C, IEEE488 і Ethernet або високошвидкісного інтерфейсу для систем HWIL. На рисунку 1.6 зображена структурна схема контролера.

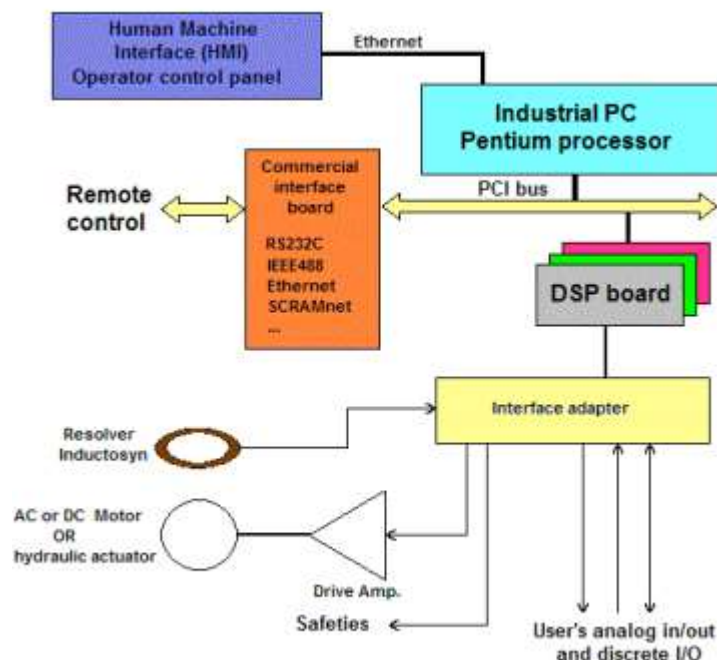


Рисунок 1.6 – Структурна схема контролера AXIDYN ND

На рисунку 1.7 зображено інтерфейс користувача контролера. Його можна запускати з будь-якого стандартного ПК за допомогою мережі підключення. Це дозволяє оператору вибирати та контролювати будь-який з можливих режимів роботи, команди керування рухом, стан імітатора з віддаленого центру керування.

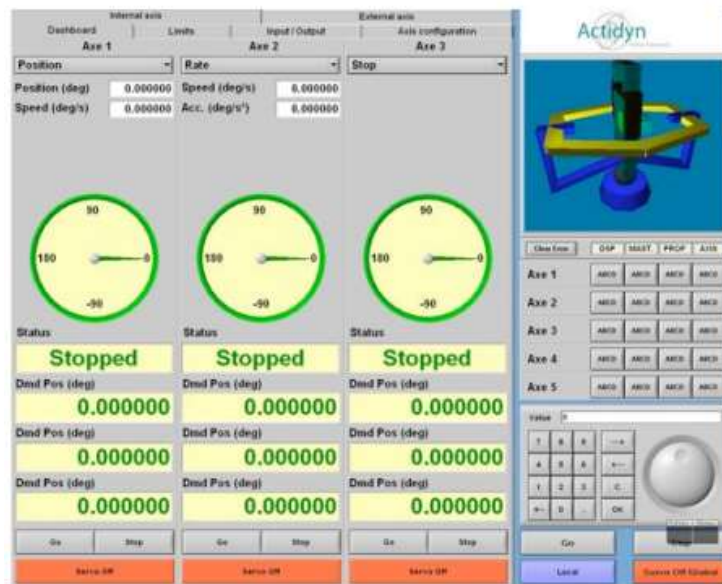


Рисунок 1.7 – Інтерфейс контролера AXIDYN ND

1.3.3 Одновісні стенди Motion Dynamic

Залежно від моделі стенди Motion Dynamic забезпечують прецизійне рівномірне обертання і кутове переміщення в горизонтальній або вертикальній площині [8]. Зовнішній вигляд стендів серії TES наведено на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд стендів серії TES

За бажанням замовника можливе проведення комплексних випробувань в поєднанні імітації руху з кліматичними факторами

(підвищена/знижена температури). Така можливість реалізується за допомогою стикування поворотного столу з температурною камерою.

Моделі TES-3V_TM і TES-4V_TM обладнані камерою з механічним охолодженням, можлива комплектація камерою з охолодженням за допомогою рідкого азоту (моделі TES-3V_TG і TES-4V_TG). Зовнішній вигляд стендів серії TES з термокамерами наведено на рисунку 1.9, їх основні технічні характеристики – у таблиці 1.4.

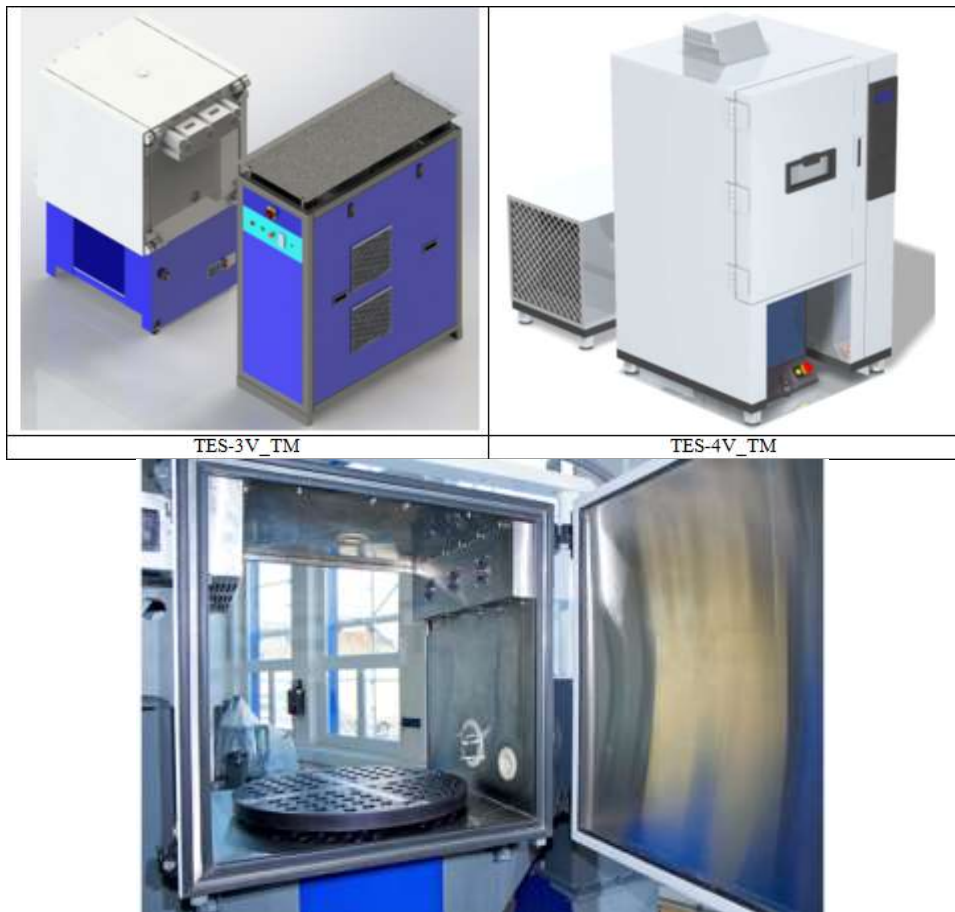


Рисунок 1.9 – Зовнішній вигляд стендів серії TES з термокамерами

Таблиця 1.4 – Технічні характеристики стендів серії TES з термокамерами

Параметр	Модель		
	TES-3V	TES-4V	TES 3AB
Номінальне навантаження на стіл, кг	30	60	20
Розмір випробуваного зразку, мм	300x300	560x500	200x240
Діаметр планшайби, мм	300	600	225
Биття осі, кут.с	$\pm < 2$	$\pm < 2$	$\pm < 0.5$
Прискорення (без навантаження), $\%c^2$	$\pm 10\ 000$	$\pm > 4\ 000$	$\pm 8\ 000$
Полоса пропускання (-3дБ), Гц	> 60	> 50	> 100

Роздільна здатність позиціонування, кут.с	<0.04	<0.01	<0.04
Швидкість, °/с	±1500	±1000	±1000
Стабільність швидкості, % від заданої швидкості за один оберт	0.001	0.0005	0.0005
Температурна камера			
Температурний діапазон, °С	-65...+115	-60...+100	
Точність підтримання температури, °С	±1	±0.5	
Швидкість охолодження, °С/хв.	5	2	
Швидкість нагріву, °С/хв.	5.5	2	

У стандартному виконанні такі установки обладнані поворотним столом зі штоком з термічно ізолюваною прокладкою. Монтаж виробів виконується на спеціальну платформу, яка може бути виготовлена на вимогу замовника залежно від геометрії виробу і програми його випробувань. По типу охолодження комбіновані установки поділяють на ТМ и ТГ модифікації.

ТМ модифікація – повітряна каскадна система охолодження.

ТГ модифікація - система охолодження рідким азотом.

1.4 Висновки до розділу 1

На сучасному ринку існують високоточні стенди, на яких можна здійснювати калібрування ПКШ, але вони не спеціалізовані під цей процес, не мають програмного забезпечення для безпосереднього визначення коефіцієнтів моделі вихідних сигналів.

2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

2.1 Структурна схема ІВС

ІВС використовується для отримання, перетворення та обробки виміральної інформації від ПКШ та вимірвальних перетворювачів температури (ВПТ) у складі ІНС. Так як для температурного калібрування ПКШ вони повинні обертатися з заданими постійною швидкістю та температурою навколишнього середовища у складі системи є допоміжні технічні засоби. ДТЗ є платформа, яка обертається з постійною кутовою швидкістю та являє собою аналог поворотного столу, якими обладнані стенди, розглянуті серед аналогічних технічних засобів в розділі 1, та термокамера. На рисунку 2.1 зображена загальна структурна схема ІВС з її основними компонентами фізичної конструкції та каналами зв'язу. На рисунку 2.2 зображено вимірвальні канали ІВС, які фізично розташовані на рухомій частині.

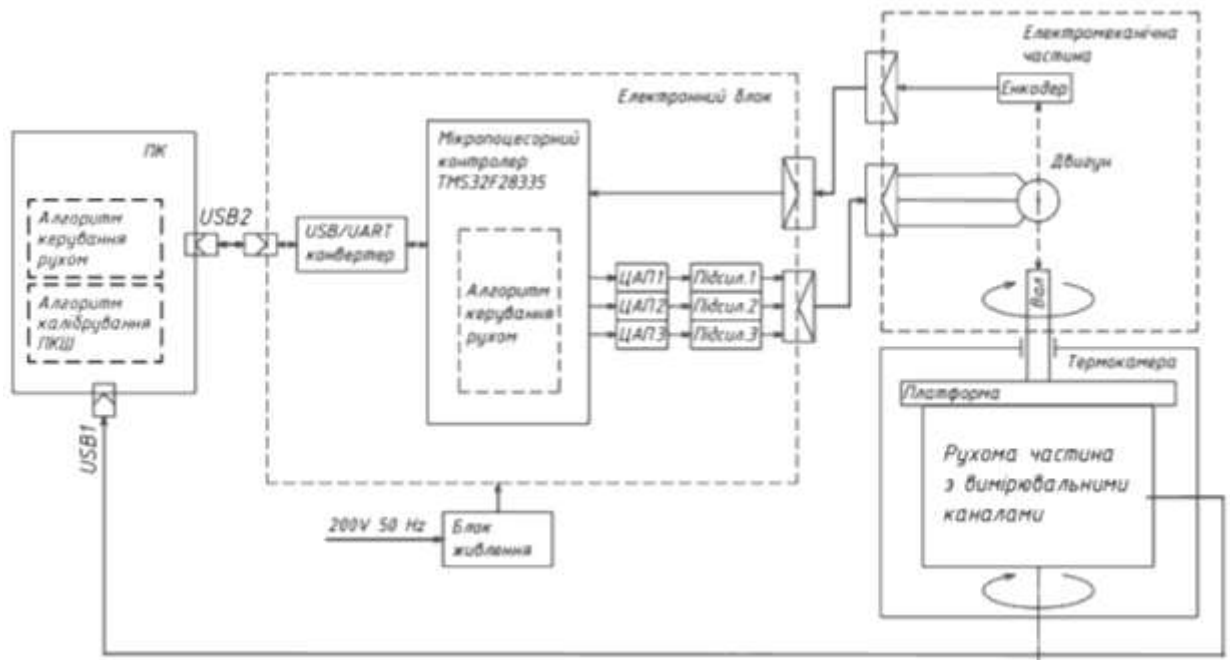


Рисунок 2.1 – Структурна схема ІВС

У кожній ІНС є три ПКШ з вбудованими ВПТ. Чутливі осі ПКШ взаємно перпендикулярні. Напруга, пропорційна виміряній кутовій

швидкості, поступає на АЦП мікроконтролера ІНС разом з напругою, пропорційною температурі ВПТ.

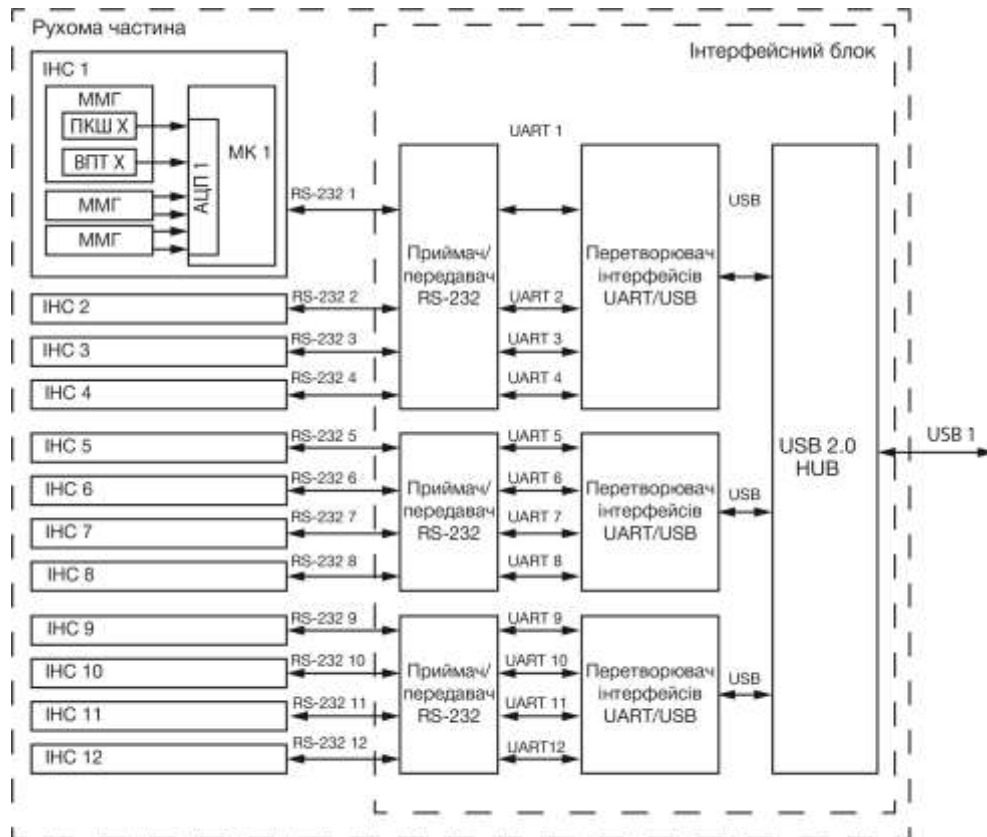


Рисунок 2.2 – Структурна схема рухомої частини ІВС

У кантувач може бути встановлено до 12 ІНС, таким чином під час процедури калібрування може відбуватися калібрування 36 ПКШ. Вихідні дані мікроконтролера ІНС, які містять коди, що відповідають вимірянній кутовій швидкості, передаються за допомогою інтерфейсу RS-232 [9].

«Інтерфейсний блок» перетворює дані ІНС з 12 інтерфейсів RS-232 на дані, що передаються по одному кабелю інтерфейсу USB на ПК, де формують 12 віртуальних COM-портів. Мікросхеми приймача/передавача RS-232 призначені для перетворення чотирьох сигналів RS-232 у сигнали TTL UART, з якими працюють мікросхеми-перетворювачі інтерфейсів UART/USB. USB Hub об'єднує дані в один інформаційний потік. На ПК встановлені драйвери, що дозволяють «бачити» 12 віртуальних COM-портів, на кожний з них надходить інформація, ідентична надісланим з

відповідних ІНС. Таке об'єднання каналів у один USB-канал дозволяє економно передати сигнали з рухомої частини через один струмоприймач на нерухому частину та підключитися до одного порту персонального комп'ютера (ПК) USB 1 версії 2.0 (див. рисунок 2.1). Розроблене програмне забезпечення (ПЗ) реалізує візуалізацію та зберігання даних ПКШ і ВПТ та алгоритм калібрування ПКШ.

Розміщення рухомої частини (див. рисунок 2.2) у термокамері дозволяє здійснювати калібрування на різних температурах для визначення коефіцієнтів температурної чутливості.

За допомогою розробленого ПЗ ПК експериментатор може керувати обертанням платформи: задавати швидкість і напрямок обертання, починати та зупиняти рух. Команди від ПК до мікроконтролера ДТЗ передаються по USB 2 (див. рисунок 2.1).

Програма МК керує трифазним безколекторним сервомотором, який обертає закріплену на його валу платформу. Поворот валу контролюється за допомогою з'єднаного з валом інкрементального енкодера.

Таким чином, для створення програмного забезпечення стенду необхідно:

- ознайомитися документацію компонентів ІВС;
- обрати мікроконтролер для керування руху стенда та розробити його програмне забезпечення;
- розробити ПЗ для ПК з інтерфейсом користувача.

2.2 Компоненти ІВС

Наведено опис тих компонентів структурними схеми, з якими безпосередньо взаємодіє розроблене програмне забезпечення, або які визначають його особливості.

2.2.1. Мікроконтролер TMS-320F28335

32-розрядні мікроконтролери C2000™ оптимізовані для в замкнутому циклі в додатках управління в реальному часі, таких як

промислові електроприводи; трифазні інвертори для сонячних батарей та цифрові джерела живлення; електромобілі та транспорт, обробка сигналів [10]. Лінія C2000 включає сімейство Delfino™ Premium Performance та сімейство Piccolo™ Entry Performance.

Пристрої TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28333, TMS320F28332, TMS320F28235, TMS320F28234 та TMS320F28232, що входять до покоління TMS320C28x/Delfino™DSC/MCU, є високоінтегрованими, високопродуктивними рішеннями для ресурсомістких програм управління. На рисунку 2.3 зображено структурну схему мікроконтролера.

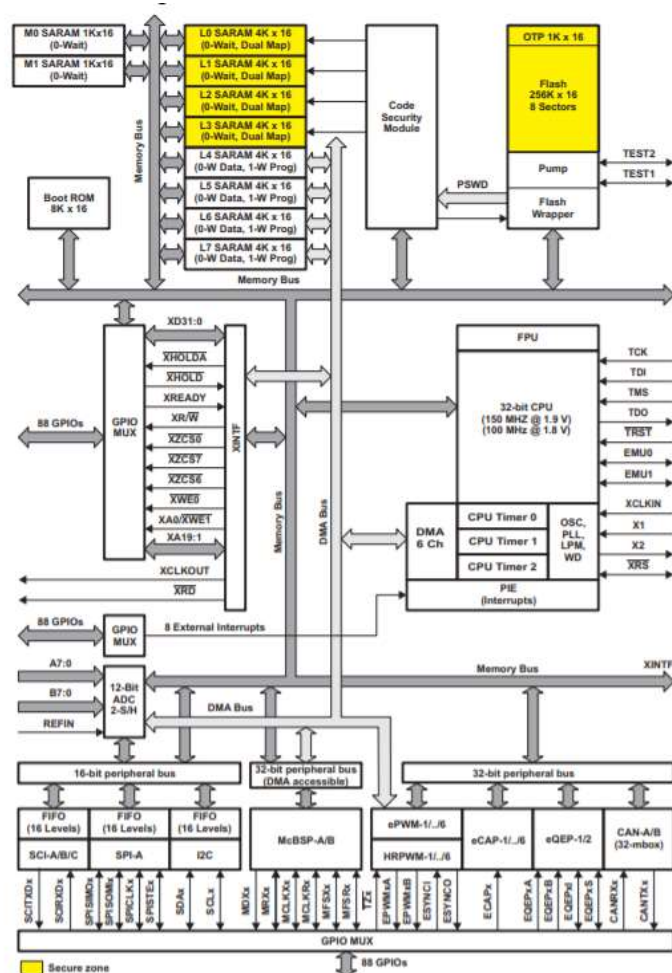


Рисунок 2.3 – Структурна схема мікроконтролерів TMS320F2833x

Вся вбудована Flash і 32 кБ RAM захищені 256-бітовим паролем [11]. У число периферійних пристроїв входить до 16 каналів 12-бітного АЦП зі швидкістю перетворення 12,5 MSPS, 18 каналів ШІМ (шість з яких з роздільною здатністю 150 нано секунд) для керування трифазними приводами, інтерфейс зовнішньої пам'яті, конфігурується як 16- або 32-бітний. TMS320F2833x підтримують безліч комунікаційних інтерфейсів для зв'язку з зовнішніми периферійними пристроями, процесорами і контролерами.

Контролери працюють на частоті 150 МГц і є відносно дешевими контролерами з плаваючою точкою.

Мікроконтролер має різноманітні модулі для роботи з зовнішніми пристроями.

Модуль enhanced capture (eCAP) використовується у системах, для яких важливий точний таймінг зовнішніх подій [12].

Модуль Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) використовується для отримання інформації про положення, напрямок та швидкість від енкодера, у нашому випадку з'єднаного з валом [13].

Наявність модулів для зручної роботи з енкодером обумовлює обрання даного мікроконтролера.

2.2.2 Інтерфейс UART

UART (англ. universal asynchronous receiver/transmitter — універсальний асинхронний приймач/передавач) — тип асинхронного приймача-передавача, призначений для організації зв'язку між цифровими пристроями з передачею даних у послідовному вигляді. Стандартом фізичного рівня інтерфейсу часто виступає RS-232. Згідно цього стандарту логічні одиниці відповідають рівні напруги від -3V до -15V, логічному нулю — від 3V до 15V.

UART може бути окремою мікросхемою або частиною мікросхеми, яка з'єднується через послідовний порт комп'ютера чи периферії. UART нині загалом включені в мікроконтролери [14].

У складі TMS320F28335 UART присутній у вигляді модулю Serial Communications Interface (SCI).

2.2.3 Шина USB

USB (англ. Universal Serial Bus) — універсальна послідовна шина, призначена для з'єднання комп'ютерів і периферійних пристроїв [15]. Галузевий стандарт, який встановлює технічні характеристики кабелів та роз'ємів та протоколів для підключення, зв'язку та електроживлення між комп'ютерами, периферійними пристроями та іншим комп'ютером

Дві звіти пари, першою передаються дані в обох напрямках (диференціальне включення), друга використовується для живлення периферійного пристрою (+5 В, 500 мА).

Система USB складається з хоста з одним або декількома портами та декількома периферійними пристроями, що утворюють багаторівневу топологію. Можуть бути включені додаткові концентратори USB, що дозволяють мати до п'яти ярусів. USB-хост може мати кілька контролерів, кожен з яких має один або кілька портів. До одного пристрою хостингу може бути підключено до 127 пристроїв. USB-пристрої послідовно з'єднані через концентратори. Хаб, вбудований в хост-контролер, називається кореневим концентратором.

2.2.4 USB hub

USB hub (концентратор) – це пристрій, який розширює один порт універсальної послідовної шини (USB) на кілька, щоб було доступно більше портів для підключення пристроїв до хост-системи, подібно до смуги живлення [16]. USB-концентратори часто вбудовуються в обладнання, наприклад, корпуси комп'ютерів, клавіатури, монітори або

принтери. Фізично окремі USB-концентратори мають широкий спектр форм-факторів: від зовнішніх коробок (схожих на Ethernet або мережевий концентратор), підключених за допомогою кабелю, до невеликих конструкцій, які можна безпосередньо підключити до USB-порту.

2.2.5 ЦАП

У якості цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) обрано 16-розрядні мікросхеми AD5546 з паралельним входом [17]. Вони забезпечують двополярну вихідну напругу відповідно до поступаючих до них кодів, визначених алгоритмом мікроконтролера (див. розділ 3.3.2). Нульовій напрузі відповідає код 0x8000 (половина максимального 16-розрядного коду ЦАП).

2.2.6 Двигун ДБМ 105-0,6-0,5-3

ДБМ – двигун безконтактний моментний [18], зовнішній вигляд зображено на рисунку 2.4. Має трьохфазну обмотку та 8 пар полюсів.

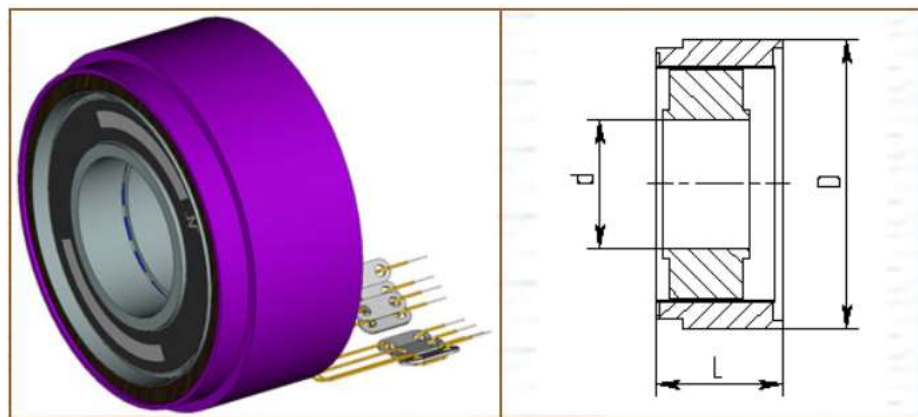


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд двигуна

2.2.7 Енкодер E40H8-3600-3-N-5 Autonics

В якості датчику положення та швидкості обертання валу використано інкрементальний оптичний енкодер фірми Autonics, що має 3600 імпульсів за оберт [19]. Він підключений до модулів мікроконтролера eCAP та eQEP.

2.3 Зовнішній вигляд ІВС

Фотографії ІВС наведені на рисунку 2.3.



а) Загальний вигляд



б) Струмopриймач, енкодер та двигун на валу



в) Платформа, кантувач з однією ІНС, інтерфейсний блок

Рисунок 2.3. – Фотографії ІВС

Висновки до розділу 2

Створено структурну схему ІВС, проаналізовано конструктивні та технологічні особливості її компонентів.

3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Розробка програмного забезпечення для мікроконтролера TMS320F28335 проводилась на мові C у інтегрованому середовищі розробки (ICP) Code Composer Studio.

Для налаштування ДТЗ було розроблено програмне забезпечення з інтерфейсом користувача, яке дозволяє отримати та візуалізувати дані від мікроконтролера для налагодження роботи регулятора. Програма розроблена на мові C++ з використанням фреймворку Qt та у ICP Qt Creator.

Програма для калібрування була вдосконалена з врахуванням описаних у розділі 4 пропозицій щодо обробки сигналів ПКШ.

3.1 Програмне забезпечення мікроконтролера

3.1.1 Code Composer Studio

Code Composer Studio - це інтегроване середовище розробки (IDE), яке підтримує портфолію мікроконтролерів та вбудованих процесорів TI [20]. Code Composer Studio містить набір інструментів, які використовуються для розробки та налагодження вбудованих додатків. Він включає компілятор C/C ++, редактор вихідного коду, середовище побудови проекту, відлагоджувач, профілер та багато інших функцій.

Інтуїтивно зрозуміла IDE забезпечує єдиний користувацький інтерфейс. Знайомі інструменти та інтерфейси дозволяють користувачам розпочати роботу швидше, ніж будь-коли раніше. Code Composer Studio поєднує в собі переваги програмного забезпечення Eclipse з передовими вбудованими можливостями налагодження від Texas Instruments (TI), що призводить до функціонального середовища для розробників вбудованих систем.

3.1.2 Пропорційно-інтегральний регулятор

Для підтримки заданої швидкості обертання програмне забезпечення, яке впливає на роботу двигуна, має бути побудоване з використанням принципів теорії автоматичного керування.

Системою автоматичного регулювання (САР) називають таку систему автоматичного керування (САК), задача якої полягає у підтримці вихідної величини об'єкта X на заданому рівні $X_{\text{зад}}$ [21]. Для цього використовується регулятор, який стабілізує вихідну величину об'єкту регулювання за заданим законом.

В системах стабілізації швидкості найбільш поширеним на практиці є пропорційно-інтегральний регулятор, завдяки своїм перевагам – здатності забезпечити мінімальні статичну похибку регулювання та малу чутливість до шумів у каналі вимірювання. Інтегральна складова в системах з ПІ-регулятором забезпечує введення астатизму, а пропорційна — визначає швидкодію системи.

Вихідним пристроєм регулятора є аналоговий вихід ЦАП.

У цифровій системі управління обчислюваний сигнал помилки є цифровим, а регулятор реалізується програмно за допомогою мікропроцесора або апаратно за допомогою спеціального обчислювального пристрою. При малих періодах дискретності T , коли похибкою інтегрування можна знехтувати, для такту n :

$$x[n] = k_0[n] + \frac{k_0 T}{T_i} \sum_{i=0}^n \theta[n-i] \quad (2.1)$$

Де x – вихідний код регулятора, k_0 – коефіцієнт пропорційної складової регулятора, T_i – постійна складова часу інтегрування, θ – похибка, різниця між заданим та поточним значенням (частоти обертання).

3.1.3 Алгоритми МК

При використанні інкрементального енкодера розпізнавання його положення можливе тільки після проходження нульової відмітки - «індексної події» у програмі. Тому для того, щоб платформа почала обертатися, спочатку необхідне повільне обертання з наростаючою амплітудою, без використання регулятора, так званий режим «синхронного двигуна». Підпрограма (функція), яка забезпечує цей режим, наведена у лістингу 3.1.

Лістинг 3.1 Режим «синхронного двигуна»

```
void Razgon()
{
    do
    {
        Amplituda = INITIAL_AMPLITUDE + timeAfterStart*300.0;
        alfa = alfa + ANGLE_OF_STAGE;
        if (alfa > 6.4)
        {
            alfa=ANGLE_OF_STAGE;
        }
        if (revers) {
            DAC0=(sin(alfa+4.2))*Amplituda+0x8000;
            DAC1=(sin(alfa+2.1))*Amplituda+0x8000;
            DAC2=(sin(alfa))*Amplituda+0x8000;
        }
        else
        {
            DAC0=(sin(alfa))*Amplituda+0x8000;
            DAC1=(sin(alfa+2.1))*Amplituda+0x8000;
            DAC2=(sin(alfa+4.2))*Amplituda+0x8000;
        }

        wr_DAC(DAC0, CS3);
        wr_DAC(DAC1, CS4);
        wr_DAC(DAC2, CS5);
        timeAfterStart = timeAfterStart + durationOfStage;
        durationOfStage = 1/(24*timeAfterStart+24);
        MKFrq = 11413333*durationOfStage;
        delay_nop(MKFrq);
        irqCntToDetectWholeRotation++;
        sumCodeOfShaftAnglePosition+=codeOfShaftAnglePosition;
        interruptsPerWholeRotations=10;
    }
    while (EQep1Regs.QEPSTS.bit.FIMF == 0);
}
```

Робота регулятора швидкості обертання здійснюється у перериваннях внутрішнього таймера МК, блок-схема алгоритму підпрограми обробки переривань зображена на рисунку 3.1.

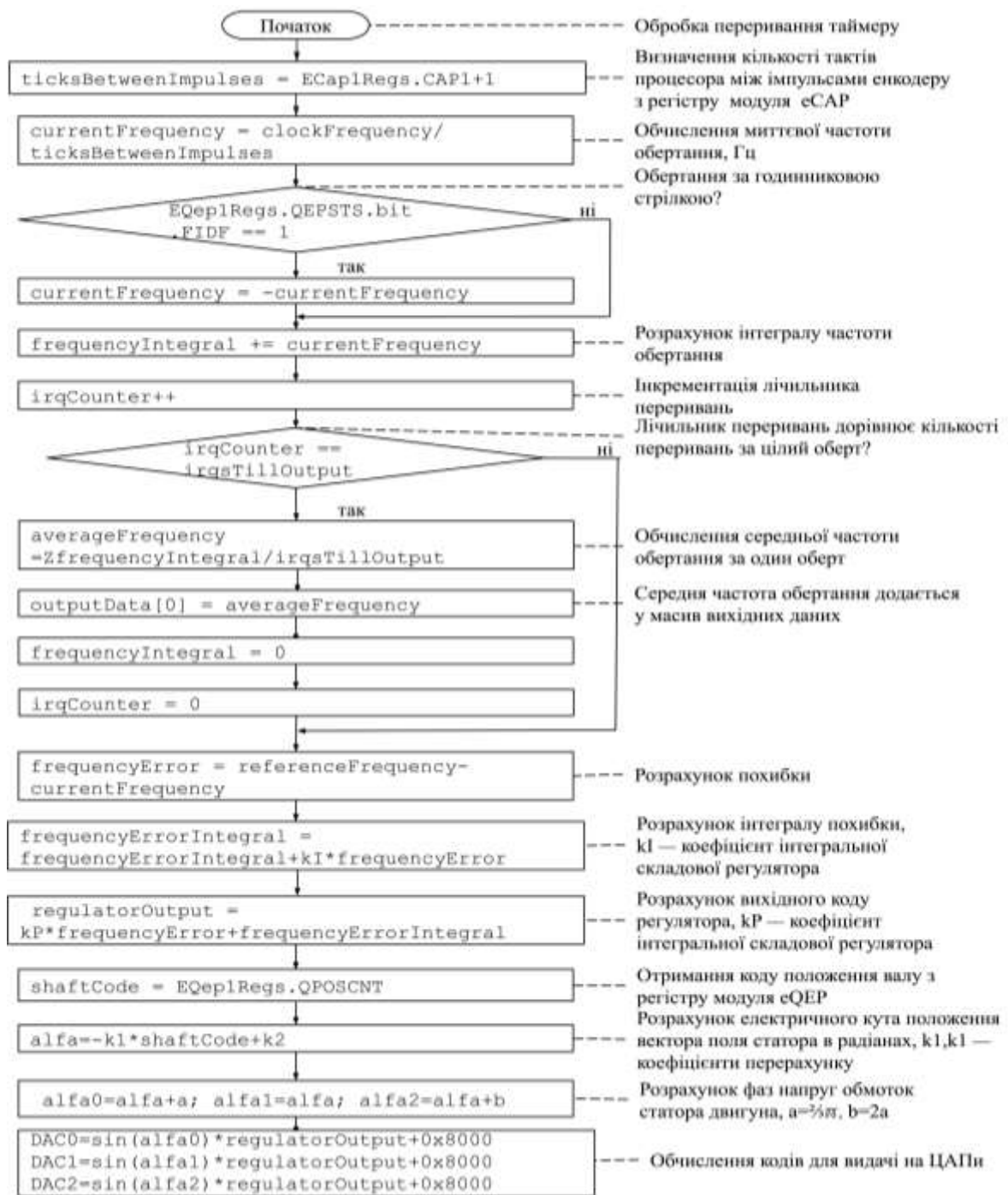


Рисунок 3.1 – Блок-схема програми обробки переривання таймеру

Модуль eQEP перетворює імпульси, що надходять від енкодера, в код поточного кутового положення, а модуль eCAP підраховує такти тактової частоти процесора між цими імпульсами для визначення миттєвої частоти обертання. Програма визначає різницю між визначеною за допомогою енкодера та заданою кутовими швидкостями, цю різницю використовує алгоритм цифрового пропорційно-інтегрального регулятора

швидкості. Визначаються добутки вихідного коду регулятора на зсунуті по фазі на 120° синусоїди-функції коду поточного кутового положення валу, помноженого на 8 за числом пар полюсів двигуна. Ці добутки подаються на ЦАП1, ЦАП2, ЦАП3. Вихідні напруги ЦАП утворюють трифазну систему напруг, які надходять на відповідні підсилювачі потужності, а з їх виходів – по кабелю на трифазні обмотки двигуна.

Програмний код підпрограми переривання наведено у лістингу 3.2.

Лістинг 3.2 – Переривання таймера

```

interrupt void cpu_timer0_isr(void)
{
    codeOfShaftAnglePosition = EQep1Regs.QPOS CNT;
    TicksPropToPeriodBtwnEncoderImpulses=ECap1Regs.CAP1+1;
    rotationFrequencyOfMotor=13500000.0/TicksPropToPeriodBtwnEncoderImpulses;
    if (EQep1Regs.QEPSTS.bit.FIDF==1)
    {
        rotationFrequencyOfMotor = -rotationFrequencyOfMotor;
    }
    irqCntToDetectWholeRotation++;
    integralOfMotorFrequency+=rotationFrequencyOfMotor;

    direction = EQep1Regs.QEPSTS.bit.FIDF;
    frequencyError = referenceFrequency_double-rotationFrequencyOfMotor;

    if (irqCntToDetectWholeRotation==interruptsPerWholeRotations)
    {
        averageMotorFrequency=integralOfMotorFrequency/interruptsPerWholeRotations;

        mas_out_Data[1]= frequencyError;
        mas_out_Data[2]= averageMotorFrequency;
        mas_out_Data[3]= codeOfShaftAnglePosition;

        yes_data=TRUE;
        integralOfMotorFrequency=0.0;
        irqCntToDetectWholeRotation=0;
    }
    integralOfffrequencyError = integralOfffrequencyError+KSIGMDV*frequencyError;

    if (integralOfffrequencyError > 10000.0) {integralOfffrequencyError=10000.0;}//2000
    if (integralOfffrequencyError < -10000.0) {integralOfffrequencyError=-10000.0;}
    regulatorOutput = KPDV*frequencyError+integralOfffrequencyError;

    if (regulatorOutput > 10000)
    {
        regulatorOutput = 10000;
    }
    if (regulatorOutput < -10000)
    {
        regulatorOutput = -10000;}
}

```

```

{
    if (codeOfShaftAnglePosition > 31900)
        codeOfShaftAnglePosition = 31900;
        if (codeOfShaftAnglePosition < -31900)
            codeOfShaftAnglePosition = -31900;

    alfaP=-0.003491*(double)codeOfShaftAnglePosition+0.65;
    alfa0=alfaP+4.538; alfa1=alfaP+0.349; alfa2=alfaP+2.443;
    DAC0=sin(alfa0)*regulatorOutput+0x8000;

    DAC1=sin(alfa1)*regulatorOutput+0x8000;
    DAC2=sin(alfa2)*regulatorOutput+0x8000;
}

wr_DAC(DAC0, CS3);
wr_DAC(DAC1, CS4);
wr_DAC(DAC2, CS5);

ECap1Regs.ECCLR.bit.CEVT1 = 1;
ECap1Regs.ECCLR.bit.INT = 1;
ECap1Regs.ECCTL2.bit.REARM = 1;
PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP1;

GpioDataRegs.GPATOGGLE.bit.GPIO0 = 1;
}

```

У лістингу 3.3 наведено функцію запису кодів у ЦАПи, що здійснюється як запис кодів у відповідний порт вводу-виводу загального призначення, до якого підключений ЦАП.

Лістинг 3.3 – Робота з ЦАП

```

void wr_DAC(long DAC,long CS)
{
    EALLOW;
    GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0xFFFFFFFF; // All outputs
    delay_nop(1);
    GpioDataRegs.GPCDAT.all = DAC;
    GpioDataRegs.GPBDAT.all =CS ; // cur_GPB ;
    delay_nop(0);
    GpioDataRegs.GPBDAT.all =PASS; //cur_GPB;
    GpioCtrlRegs.GPCDIR.all = 0x00000000; // All inputs
    EDIS;
}

```

В основному тілі програми виконується прийом заданої швидкості, команд початку та зупинки роботи, а також видача на ПК даних про середню частоту обертання за оберт.

У лістингах 3.2 та 3.3 наведено код підпрограм отримання команд та параметрів.

Лістинг 3.2 – Підпрограма отримання команд старт та стоп

```

BOOL GetCommand(void)
{
    while(SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFST !=1) { } // wait for RRDY/RXFFST =1 for 1 data
    available in FIFO
    id_cmd = SciaRegs.SCIRXBUF.all;
    return TRUE;
}

BOOL GetPar(void)
{
    while(SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFST !=1) { } // wait for RRDY/RXFFST =1 for 1 data
    available in FIFO
    tmpW1 = SciaRegs.SCIRXBUF.all;
    while(SciaRegs.SCIFFRX.bit.RXFFST !=1) { } // wait for RRDY/RXFFST =1 for 1 data
    available in FIFO
    tmpW2 = SciaRegs.SCIRXBUF.all;
    referenceFrequency_word=tmpW1 + ((tmpW2 & 0x000FF)<<8);
    if (referenceFrequency_word & 0x8000)
    {referenceFrequency_word &=0x7FFF;
    referenceFrequency_word = -referenceFrequency_word;
    revers=TRUE;}
    referenceFrequency_word=referenceFrequency_word*10;
    return TRUE;
}

```

У програмі передбачена видача впродовж оберту даних, що характеризують поточний рух. Формат пакету:

- байти синхронізації 0xAA, 0xBB;
- frequencyError - різниця між визначеною за допомогою енкодера та заданою кутовими швидкостями;
- averageMotorFrequency - середня швидкість за оберт;
- codeOfShaftAnglePosition – код поточного кутового положення;
- checksum – звичайна контрольна сума.

У лістингу 3.3 наведено код видачі даних на ПК.

Лістинг 3.3 – Код видачі даних на ПК

```

do
{
    yes_data=FALSE;
    do {} while(!yes_data);
    wr_word(0xbbaa);
    counter++;
    mas_out_Data[0] = counter;
    checksum = 0;
    for (i = 0; i < 5; i++){
        checksum+=mas_out_Data[i];
    }
    mas_out_Data[4]=checksum;
    for (i = 0; i < 5; i++){
        wr_word(mas_out_Data[i]);
    }
}
while (!StopCmd());

```


3.2 Програми з інтерфейсом користувача

3.2.1 Qt

Qt — крос-платформовий інструментарій розробки програмного забезпечення (ПЗ) мовою програмування C++ [22]. Дозволяє запускати написане за його допомогою ПЗ на більшості сучасних операційних систем (ОС), просто компілюючи текст програми для кожної операційної системи без зміни початкового коду. Містить всі основні класи, які можуть бути потрібні для розробки прикладного програмного забезпечення, починаючи з елементів графічного інтерфейсу й закінчуючи класами для роботи з мережею, базами даних, OpenGL, SVG і XML. Бібліотека дозволяє керувати потоками, працювати з мережею та забезпечує крос-платформовий доступ до файлів.

Починаючи з версії 4.5, до комплекту Qt включене середовище розробки Qt Creator, яке містить у собі редактор коду, довідку, графічні засоби Qt Designer і можливість відлагодження застосунків.

3.2.2 Програма для налаштування ДТЗ

Інтерфейс програми зображено на рисунку 3.2.

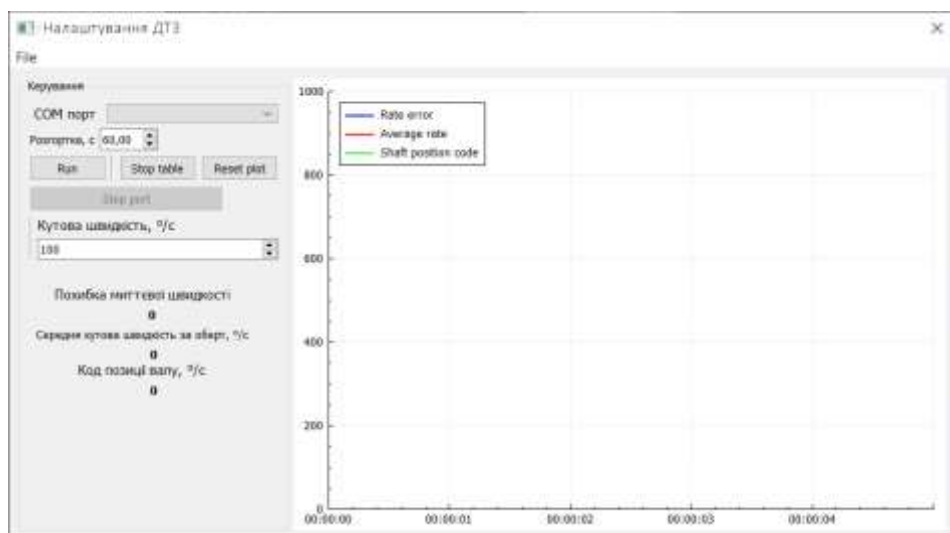


Рисунок 3.2 – Блок-схема програми налаштування ДТЗ

Програма візуалізує та зберігає у файл дані, що поступають від мікроконтролера. Це дозволяє оцінити рівномірність обертання впродовж обороту. У лістингу 3.4 наведено код підпрограми отримання даних від мікроконтролера

Лістинг 3.4 – Отримання даних від мікроконтролера

```
void MainWindow::update_plot_values()
{
    // Wait for sync bytes: 0xaa 0xbb.
    if (!caughtSyncBytes)
    {
        // Wait for two sync bytes: 0xaa and 0xbb.
        if (comPort->getSerialPort()->bytesAvailable() < 2)
            return;
        QByteArray syncByteArray;
        syncByteArray.append(0xaa);
        syncByteArray.append(0xbb);
        rawDataBuffer = comPort->getSerialPort()->read(2);
        // Compare two bytes with (0xaa, 0xbb) array
        if (rawDataBuffer != syncByteArray)
            return;
        caughtSyncBytes = true;
    }
    // Wait for the whole 15bit package: 1 length + 6*2 data + 1*2 checksum.
    if (comPort->getSerialPort()->bytesAvailable() < (MAX_PKG_SIZE - 2))
        return;
    // Get package of data from the PRS.
    rawDataBuffer = comPort->getSerialPort()->read(MAX_PKG_SIZE - 2);
    // Checksum final check.
    pkgChecksum = comPortUtils->processChecksum(rawDataBuffer);
    bool pkgIsValid = comPortUtils->checksumIsValid(rawDataBuffer, pkgChecksum);
    ui->label_6->setText(rawDataBuffer.mid(8, 2).toHex());
    ui->label_7->setText( QString::number(comPortUtils->
        processRawInt16(rawDataBuffer.mid(8, 2).toHex())));
    ui->label_8->setText( QString::number(pkgChecksum));
    if (pkgIsValid == false)
        return; // checksum mismatch.
    ui->label_9->setText( QString::number(comPortUtils->
        processRawInt16(rawDataBuffer.mid(0, 2).toHex())));
    ui->label_3->setText(rawDataBuffer.mid(0, 8).toHex());
    rateError = comPortUtils->processRawInt16(rawDataBuffer.mid(2, 2).toHex());

    ui->label_4->setText(rawDataBuffer.mid(4, 2).toHex());
    averageRate = comPortUtils->processRawInt16(rawDataBuffer.mid(4, 2).toHex());
    ui->label_5->setText(rawDataBuffer.mid(6, 2).toHex());
    shaftPositionCode = comPortUtils->processRawInt16(rawDataBuffer.mid(6, 2).toHex());
    updateUIValues();
    caughtSyncBytes = false;
    packagesCounter++;
}
```

3.2.3 Програма для калібрування

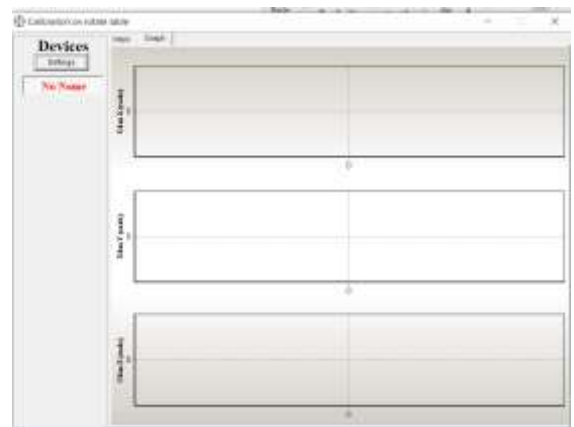
Процедура калібрування відбувається наступним чином: кожна вісь калібрується при сталій температурі у термокамері у всьому діапазоні швидкостей обертання з деяким кроком, потім змінюють температуру у термокамері, потім після проведення калібрування на кожній температурі змінюють вісь. Зовнішній вигляд програми наведено на рисунку 3.2.

У розробленій програмі з графічним інтерфейсом здійснюється:

- визначення осі (гіроскопу) по якому буде відбуватися калібрування, відзначається температура у кліматичній камері та швидкість обертання;
- встановлення зв'язку з ІНС, що калібруються;
- подаються команди початку та закінчення обертання на TMS320F28335;
- будуються графіки вихідних сигналів ПКШ;
- дані з ІНС записуються у файл, формату .txt, приклад фрагменту файлу наведено на рисунку 3.4;
- по закінченню калібрування обчислюються коефіцієнти моделі вихідних сигналів ПКШ;



а) визначення параметрів



б) побудова графіків

Рисунок 3.3 а, б – Інтерфейс користувача програми температурного калібрування ІВС

Серійний номер	Порядковий № каналу	Порядковий № температури	Порядковий № пристрою	Код по осі X	Код по осі Y	Код по осі Z	Термодатчик 1	Термодатчик 2	Термодатчик 3	Термодатчик 4	Термодатчик 5	Термодатчик 6	Напрямок зчитування	
C3790001	0	0	0	-4540,1040	34,5593	-31,8743	1700	1700	1707	1791	1700	1700	-22234 -22234 -22234	11,5214
C3790001	0	0	1	-4111,7093	55,1363	-14,8113	1705	1707	1700	1700	1705	1710	-22240 -22240 -22240	11,5173
C3790001	0	0	2	-4119,0705	31,9050	-7,0530	1724	1721	1725	1720	1723	1722	-22217 -22217 -22217	11,5206
C3790001	0	0	3	-4042,0478	42,8105	-9,8230	1704	1700	1706	1709	1705	1708	-22197 -22197 -22197	11,5213
C3790001	1	0	0	-3962,5130	27,0417	-30,3575	1717	1710	1700	1717	1710	1710	-22205 -22205 -22205	11,5210
C3790001	1	0	1	-3930,0553	49,7073	-12,4440	1707	1700	1700	1700	1700	1707	-22267 -22267 -22267	11,5173
C3790001	1	0	2	-3932,1300	30,7000	-6,7002	1723	1720	1720	1721	1721	1720	-22236 -22236 -22236	11,5206
C3790001	1	0	3	-3920,1450	52,0300	-0,7220	1700	1700	1700	1700	1707	1705	-22210 -22210 -22210	11,5214
C3790002	2	0	0	-2876,7005	19,0420	-24,2707	1700	1705	1700	1700	1707	1700	-22240 -22240 -22240	11,5219
C3790002	2	0	1	-2750,1910	44,2013	-10,0070	1700	1707	1701	1700	1707	1701	-22270 -22270 -22270	11,5175
C3790002	2	0	2	-2644,4300	34,7253	-0,4010	1720	1710	1710	1710	1710	1710	-22240 -22240 -22240	11,5207
C3790002	2	0	3	-2937,4393	43,0042	33,5403	1710	1710	1710	1710	1710	1710	-22232 -22232 -22232	11,5217
C3790002	3	0	0	-2991,0177	11,8233	-24,4093	1710	1717	1715	1715	1715	1715	-22210 -22210 -22210	11,5214
C3790002	3	0	1	-2999,3500	36,4040	-7,7107	1700	1710	1710	1710	1710	1710	-22200 -22200 -22200	11,5182
C3790002	3	0	2	-2751,7077	21,0010	-0,2040	1710	1717	1715	1715	1717	1710	-22254 -22254 -22254	11,5211
C3790002	3	0	3	-1994,7315	33,1213	-29,4512	1705	1705	1705	1705	1705	1705	-22242 -22242 -22242	11,5219

Рисунок 3.4 – Фрагмент файлу

У лістингу 3.1 наведено алгоритм рухомого середнього, який застосовується для обробки кодів ПКШ:

Лістинг 3.1

```
void smooth(double *input, double *output, int n, int window)
{
    int i,j,z,k1,k2,hw;
    double tmp;
    if(fmod(window,2)==0)
        window++;
    hw=(window-1)/2;
    output[0]=input[0];
    for (i=1;i<n;i++) {
        tmp=0;
        if(i<hw) {
            k1=0; k2=2*i; z=k2+1;
        }
        else if((i+hw)>(n-1)) {
            k1=i-n+1; k2=n-1; z=k2-k1+1;
        }
        else {
            k1=i-hw; k2=i+hw; z=window;
        }
        for (j=k1;j<=k2;j++) {
            tmp=tmp+input[j];
        }
        output[i]=tmp/z;
    }
}
```

3.3 Висновки до розділу 3

Розроблено програми, що забезпечують функціонування ІВС. Описано їх функції, характеристики та особливості.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Теоретичні відомості

Випадковим сигналом називають функцію часу, значення якої заздалегідь невідомі і можуть бути передбачені лише з певною ймовірністю [23]. До основних характеристик випадкових сигналів відносяться:

- закон розподілу (відносний час перебування значення сигналу в певному інтервалі),
- спектральний розподіл потужності.

Випадкові сигнали діляться на два класи: 1) шуми - безладні коливання, що складаються з набору різних частот і амплітуд, 2) сигнали, що несуть інформацію, для обробки яких потрібно вдаватися до ймовірнісних методів.

Випадкові сигнали характеризуються щільністю розподілу ймовірностей. Щільність ймовірності це один із способів завдання розподілу випадкових величин. Щільність ймовірності - невід'ємна функція при будь-яких значеннях дискретного сигналу. Для аналогових випадкових сигналів інтеграл від функції сигналу у всьому діапазоні значень прямує до одиниці. Для дискретних випадкових величин не існує функції щільності розподілу ймовірностей, тому що дискретна випадкова величина не є безперервною функцією. Однак, математичний апарат дозволяє обчислювати наближені значення функції.

4.2 Експериментальні дослідження ПКШ

Було проведено дослідження шумів ПКШ у нерухомому стані та під час обертання з постійною швидкістю за допомогою ДТЗ ІВС для оцінки впливу ДТЗ на шум у вихідних сигналах ПКШ при калібруванні.

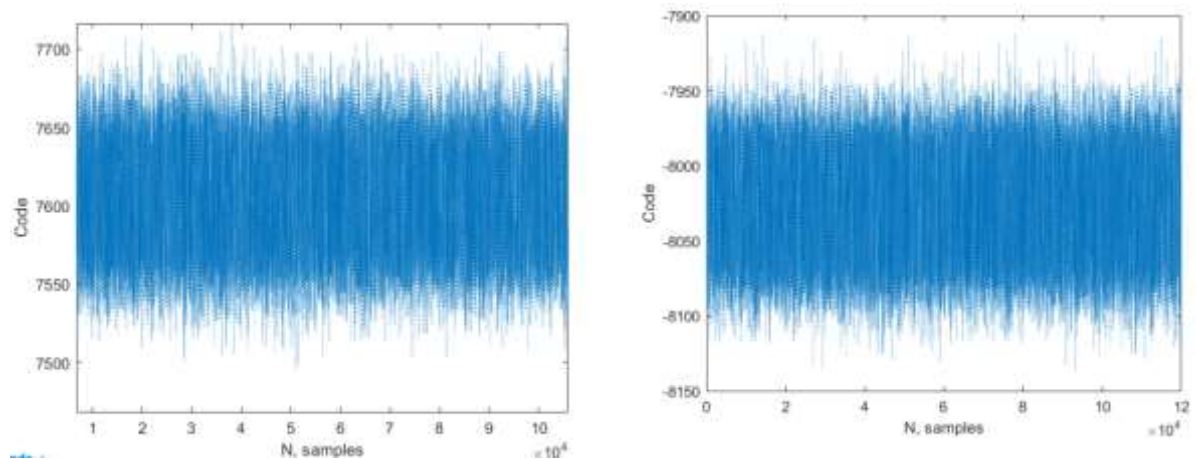
При калібруванні вихідні сигнали ПКШ усереднюються відносно тривалості етапу калібрування (обертання з постійною швидкістю). Якщо калібрування здійснюється при однакових за модулем але різних та

напрямком швидкостях, це дозволяє практично виключити із результату зміщення нуля.

Для цього вихідні сигнали знімалися 10 хвилин з частотою 200 Гц та за допомогою статистичних методів обробки даних досліджувались з використанням програми Matlab.

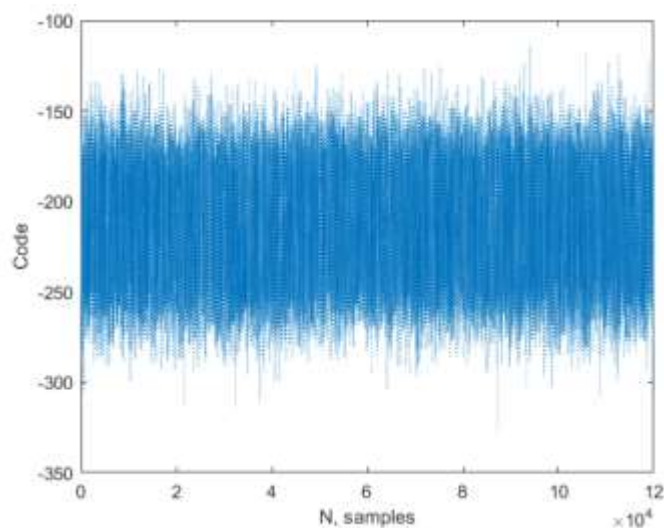
Спочатку було отримано вихідні коди ПКШ, вісь чутливості якого була паралельна осі обертання, у нерухомому стані та при обертанні зі швидкостями $-100^\circ/\text{с}$ та $+100^\circ/\text{с}$.

На рисунку 4.1 зображено графіки вихідного сигналу ПКШ (дискретний сигнал, розмірність – коди АЦП).



а) швидкість $+100^\circ/\text{с}$

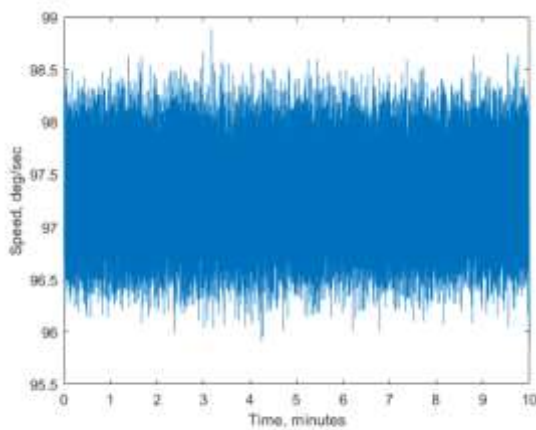
б) швидкість $-100^\circ/\text{с}$



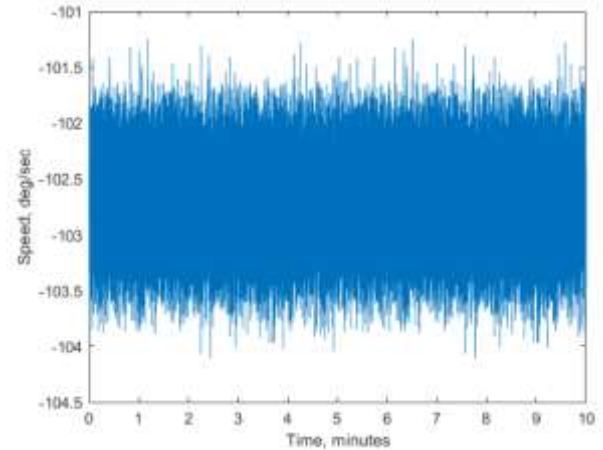
б) нерухомий

Рисунок 4.1 а,б,в – Вихідні коди ПКШ

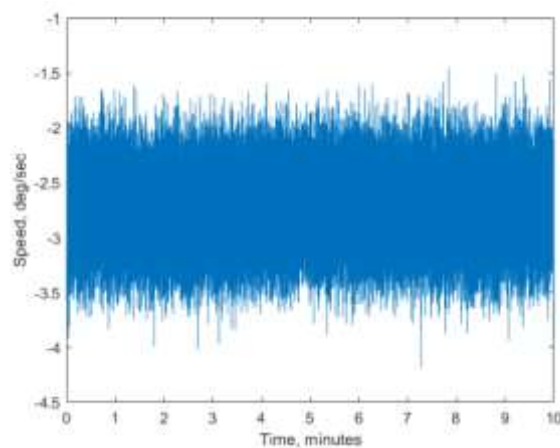
Потім за значенням оцінки математичного очікування сигналів було знайдено коефіцієнт пропорційності між кодами та швидкістю обертання. На рисунку 4.2 зображені графіки вихідних сигналів ПКШ у розмірності $^{\circ}/\text{с}$.



а) швидкість $+100^{\circ}/\text{с}$



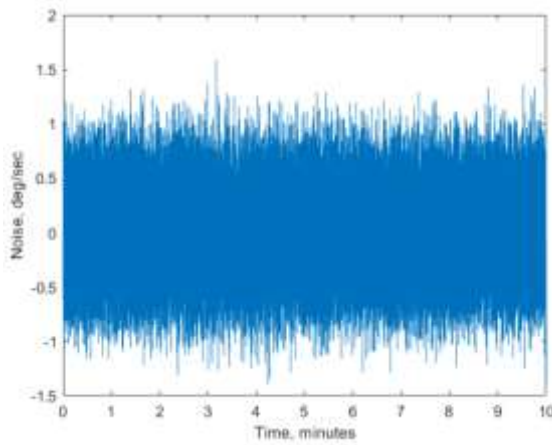
б) швидкість $-100^{\circ}/\text{с}$



б) нерухомий

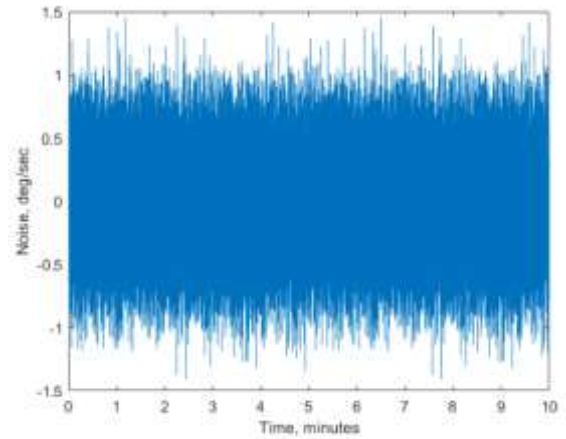
Рисунок 4.2 а,б,в – Вихідні сигнали ПКШ у розмірності $^{\circ}/\text{с}$.

Віднявши від вихідних сигналів оцінки їх математичних очікувань можна отримати шум, який для нерухомого ПКШ є шумом самого ПКШ, а під час руху містить у собі і шум, викликаний нерівномірністю швидкості обертання, що доводять значення середньоквардатичного відхилення (СКВ), яке для нерухомого ПКШ є меншим. Графіки шумів та значення СКВ зображено на рисунку 4.3.



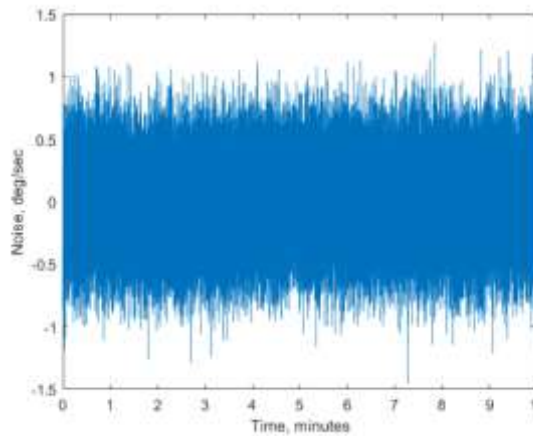
`STD_RandComp_plus_100 = 0.3509`

а) швидкість +100°/с



`STD_RandComp_minus_100 = 0.3533`

б) швидкість -100°/с



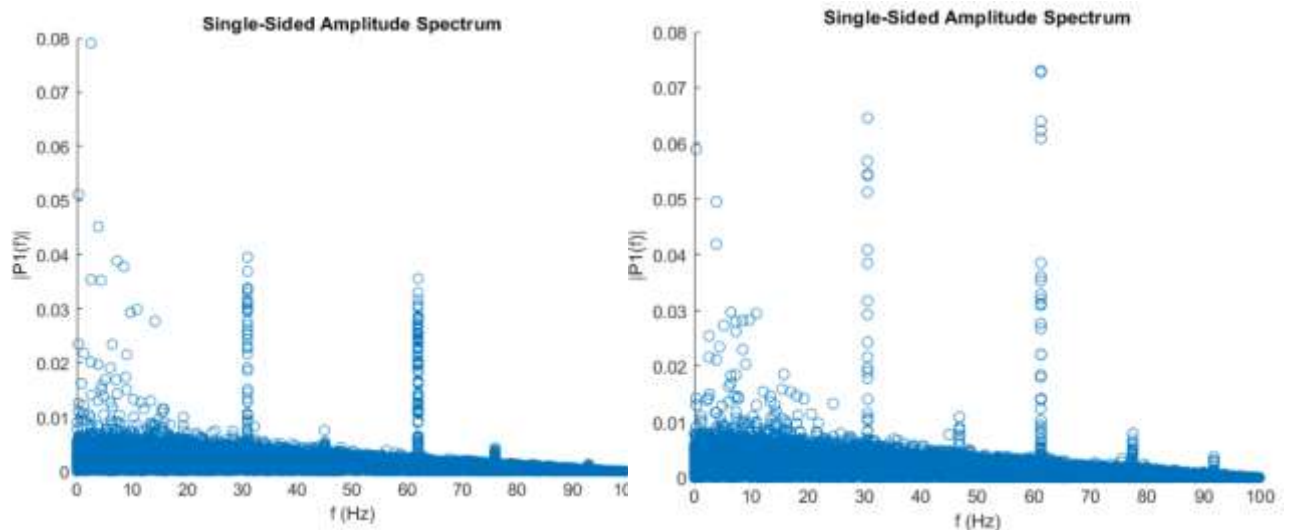
`STD_RandComp_no_speed = 0.2990`

б) нерухомий

Рисунок 4.3 а,б,в – Шуми у розмірності °/с.

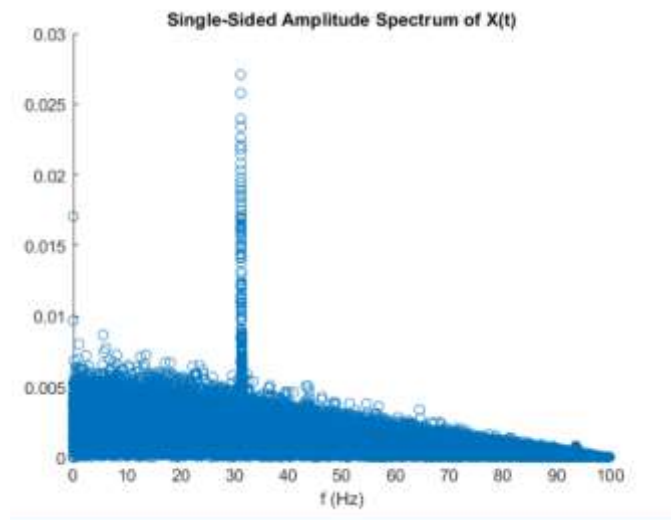
Спектральний аналіз сигналу дозволить зрозуміти фізичну природу виникнення шумів. Щоб перетворити сигнал з часової області в частотну і назад необхідно виконати дискретне перетворення Фур'є.

За допомогою швидкого перетворення Фур'є у програмі Matlab побудовано спектри шумів сигналів ПКШ, зображені на рисунку 4.4.



а) швидкість +100°/с

б) швидкість -100°/с



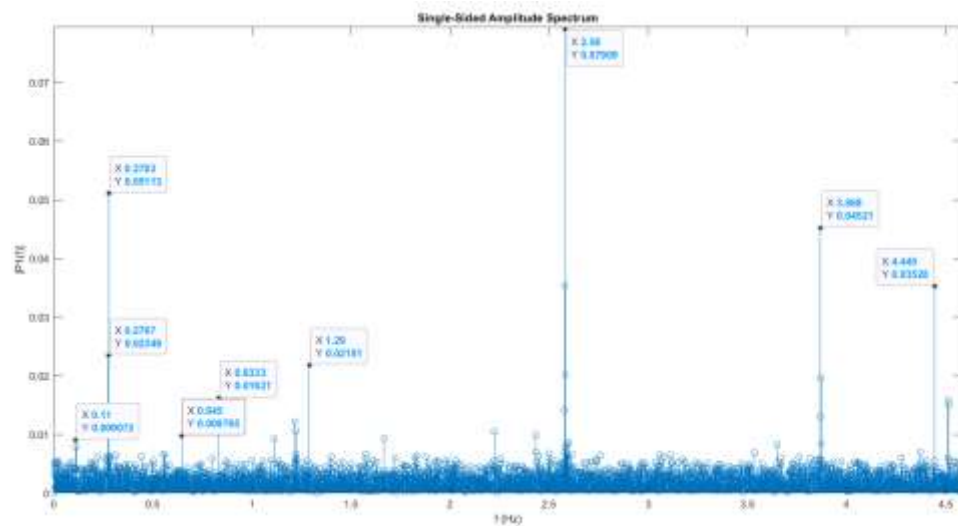
б) нерухомий

Рисунок 4.3 а,б,в – Амплітудні спектри сигналів

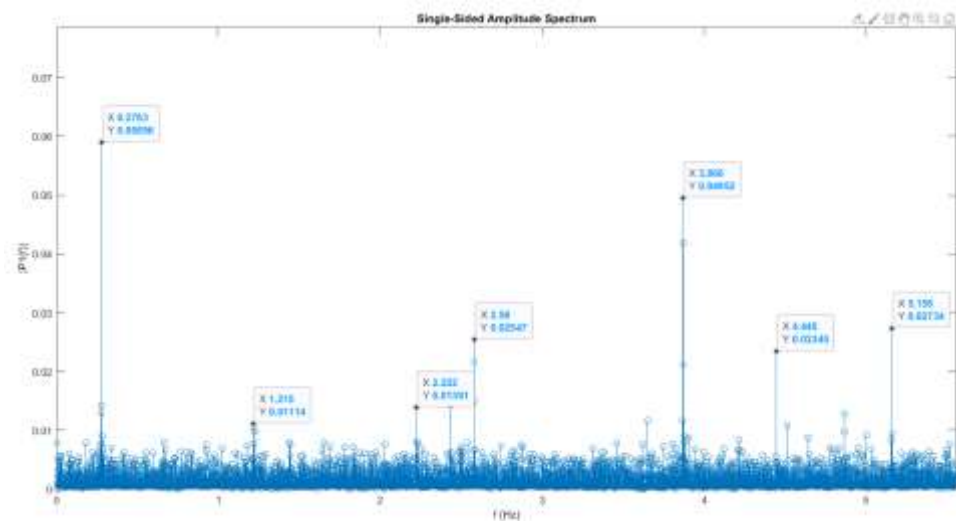
У спектрі нерухомого ПКШ є стрибок амплітуди на частоті близько 31 Гц, цей стрибок пов'язаний зі специфікою конструкції та вібраційним принципом роботи ПКШ. Природньо, що цей стрибок є і у спектрах вихідних сигналів при обертанні.

У спектрах вихідних сигналів при обертанні з'являється складова з частотою приблизно 62 Гц, яка є подвійною відносно стрибка у 31 Гц, яка ймовірно є реакцією механічної частини ПКШ на появу кутової швидкості і не може бути спричинена нерівномірністю обертання платформи стенду.

Однак, на відміну від спектру нерухомого ПКШ, у спектрах при обертанні з'явилися низькочастотні складові, більшість частот яких є кратними частоті обертання поворотної платформи (при абсолютному значенні кутової швидкості $100^\circ/\text{с}$ це 0.277 Гц). На рисунку 4.4 зображено фрагменти графіків амплітудних спектрів для дослідження низькочастотних складових.



а) кутова швидкість $100^\circ/\text{с}$



б) кутова швидкість $-100^\circ/\text{с}$

Рисунок 4.4 а,б – Фрагменти амплітудних спектрів сигналів

Інші складові пов'язані з нестаціонарністю сил тертя у підшипникових опорах валу, на якому закріплена платформа, тертя валу та

термоізолюючого ущільнювача, та незначними вібраціями, які виникають при русі платформи.

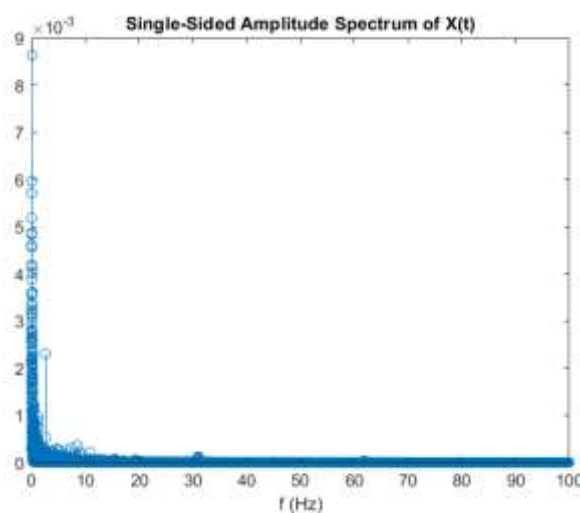
Було прийнято рішення застосувати алгоритм рухомого середнього для згладжування даних.

Ковзне середнє або рухоме середнє (англ. moving average) — інструмент аналізу випадкових процесів та часових рядів, який за своєю суттю є обчисленням середнього для певної підмножини значень.

Підмножина, від якої обчислюється середнє значення, залежно від обраного різновиду рухомого середнього може мати як сталий так і змінний розмір. Ковзне середнє може мати вагові коефіцієнти. Існують алгоритми простого, зваженого, експоненційного та модифікованого рухомого середнього.

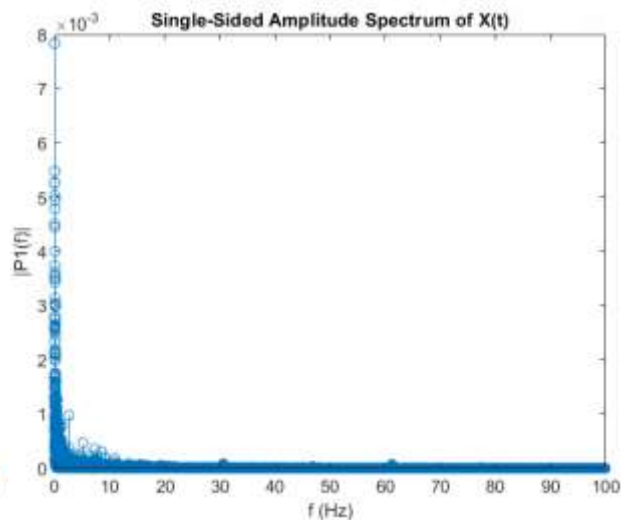
Ковзне середнє найчастіше застосовується для аналізу часових рядів з метою згладжування раптових коливань, визначення довготермінових трендів. Математично ковзне середнє є одним з різновидів згортки. У теорії обробки сигналів є фільтром з кінцевою імпульсною характеристикою.

За ширину вікна обрано тривалість одного оберту. На рисунку 4.5 зображено СЦП після застосування цього алгоритму.



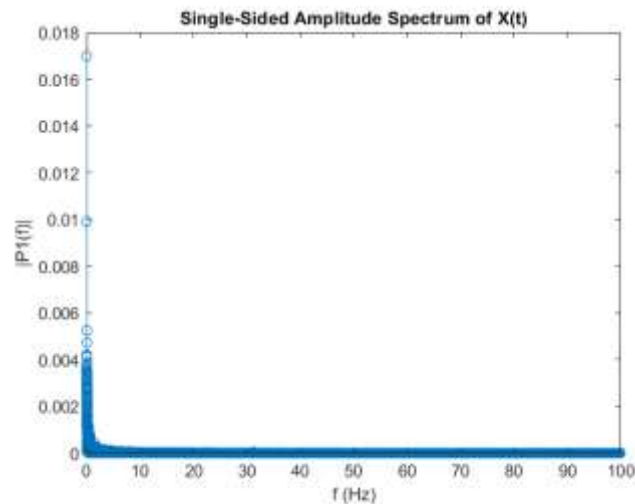
СКВ=0.0201

а) швидкість +100°/с



СКВ=0.0182

б) швидкість -100°/с



$$\text{СКВ} = 0.0231$$

б) нерухомий

Рисунок 4.5 а,б,в – Амплітудні спектри сигналів після алгоритму ковзного середнього

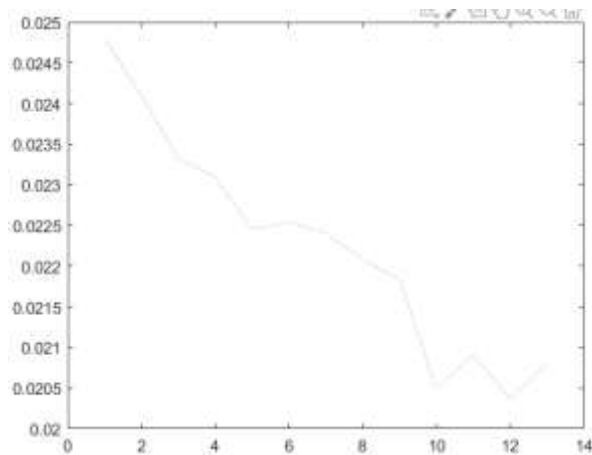


Рисунок 4.5 а,б,в – Залежність СКВ від часу

З рисунку 4.5 видно, що СКВ залежить від часу, але не суттєво, тому можна обрати тривалість вимірювання для швидкості 100°/с 5 хвилин, що відповідає приблизно 80 обертам.

4.3 Висновки до розділу 4

Для підвищення точності калібрувань необхідно застосовувати алгоритм рухомого середнього, оптимальна тривалість одного етапу калібрування залежить від швидкості, за тривалість одного етапу обираємо час, за який буде здійснено 80 обертів.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ «ІВС ТЕМПЕРАТУРНОГО КАЛІБРУВАННЯ ПКШ»

5.1 Опис ідеї проекту

У 2018 році глобальний ринок інерційних навігаційних систем досяг величини 10.1 білльона доларів США[26]. Згідно маркетингових досліджень компанії Research Nester очікується зростання глобального ринку інерційних навігаційних систем, до 7 відсотків CAGR (сукупного середньорічного темпу зростання) [27]. Дослідники виділяють використання мікромеханічних технологій як один з драйверів росту, адже «завдяки використанню MEMS виробники мають виробничі економічно вигідні та ефективніші рішення, в результаті чого з'являються легкі, малі та дешеві навігаційні системи». Калібрування інерційної навігаційної системи, яке включає в себе калібрування ПКШ у її складі, є необхідним етапом перед введенням у експлуатацію.

В цьому розділі буде проведено аналіз стартап проекту «Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування перетворювачів кутової швидкості» («ІВС температурного калібрування ПКШ»).

Існуючі на світовому ринку системи для калібрування побудовані таким чином, що для виконання повної процедури температурного калібрування необхідно придбати поворотний стіл, розроблену або відповідну йому термокамеру та систему управління. Це обладнання високоточне та якісне, але розробникам (виробникам) та користувачам ІНС на MEMS-перетворювачах не потрібні системи з такими високими технічними вимогами, до того ж ці системи відносно дорогі, що збільшує період окупності.

Ідея проекту полягає у тому, що на відміну від пропозицій, наявних на світовому ринку, розроблена ІВС є менш точною, але вона буде економічно доступною для ширшого кола розробників. Вона складається з електронного та електромеханічного блоку, термокамери та програмного

забезпечення для персонального комп'ютера. ІВС можна буде придбати у різній комплектації – якщо у замовника вже є термокамера, то постачальниками розробленої ІВС вона може бути відносно легко модифікована для встановлення електромеханічної частини.

В розділ опису проекту входять:

- зміст запропонованої ідеї;
- можливі напрямки застосування;
- основні вигоди, що може отримати кінцевий користувач;
- відмінність від аналогів [28].

Перші три пункти оформлені в вигляді таблиці для зручнішого уявлення про ідею.

В таблиці 5.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Пропонується інформаційно-вимірювальна система для температурного калібрування мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості.	Приладобудування	Калібрування компонентів або систем орієнтації та навігації під час їх виробництва
	Суднобудування	Калібрування систем орієнтації та навігації перед встановленням у судна
	Авіабудування	Калібрування систем орієнтації та навігації перед встановленням у літальні апарати

	Інформаційні технології	Калібрування систем орієнтації та навігації при розробці для них програмного забезпечення
--	-------------------------	---

Отже, пропонується нова ІВС для температурного калібрування ПКШ, яка дозволяє здешевити процес визначення коефіцієнтів моделі вихідних сигналів ПКШ. Система може застосовуватись в різноманітних областях промисловості. На практиці було створено електричну та електромеханічну складові системи, розроблено програмне забезпечення для неї, виконані експериментальні дослідження, які підтвердили її відповідність заявленим технічним та експлуатаційним характеристикам.

Морфологічна карта стартапу наведена у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Морфологічна карта

№ п/ п	Основні параметри	Проміжні рішення		
1.	Діапазон швидкостей, °/с	±2000	±1500	±1000
2.	Діапазон температур термокамери, °С	-80...+100	-40...+80	-20...+60
3.	Номінальне навантаження на стіл, кг	60	30	6
4.	Мікроконтролер	TMS320F28335	ADuCM360	STM32
5.	Технологія розробки графічного інтерфейсу користувача	Delfi	Qt	MFC

Було прийнято рішення створювати систему на основі мікроконтролера TMS320F28335, з наступними технічними характеристиками: діапазон швидкостей $\pm 1000^\circ/\text{с}$, діапазон температур термокамери $-80^\circ\text{C} \dots +100^\circ\text{C}$, номінальне навантаження на стіл 6 кг. Такі

характеристики є достатніми для калібрування ПКШ у складі МЕМС-ІНС. Розробка графічного інтерфейсу користувача здійснюється за допомогою сучасного та кросплатформерного фреймворку Qt, що дозволить встановлювати це ПЗ на ПК з будь-якої операційною системою, а також забезпечувати підтримку та оновлення ПЗ.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів представлено у вигляді таблиці 5.3 та передбачає [28]:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик товару;
- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) і товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проведення збору інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;
- порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтра- льна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	simexONE Acutronic	ACTIDYN RT 1100	Motion Dynamics TES- 3V_TM			
1.	Вартість розробки (грн.)	270 000	8 000 000	5 000 000	3 000 000	-	-	+
2.	Термін розробки	6 місяці	12 місяців	12 місяців	12 місяців	-	-	+
3.	Вик. сучасних технологій	Сучасні	Сучасні	Сучасні	Сучасні	-	+	-

4.	Діапазон швидкостей, %с	±1000	±1800	±2000	±1500	+	-	-
5.	Номінальне навантаження на стіл, кг	6	22/44	12/40/70	20/20/60	+	-	-
6.	ПЗ для температурного калібрування ПКШ	Є	Немає	Немає	Немає	-	-	+
7.	Одночасне калібрування декількох датчиків	Є	Немає	Немає	Немає	-	-	+
9.	Торгова марка	Немає	Є	Є	Є	+	-	-

Отже, запропонована ідея має певні переваги і недоліки. Серед переваг можна виділити відносно не велику вартість розробки, спеціалізацію системи для роботи з ПКШ, високу продуктивність калібрувань завдяки одночасному калібруванню до 12 ІНС з 36 ПКШ. Проте недоліками проекту є нижчі діапазон швидкостей та номінальне навантаження. Але для MEMS-ІНС це не є недоліками, адже розроблена система перекриває їх діапазон швидкостей та самі ІНС важать не багато.

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару) [28]. Результати аналізу, спрямованого на визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
-------	--------------	--------------------------	----------------------	------------------------

1.	Температурне калібрування MEMS-перетворювачів кутової швидкості	Використання стенда з нормованими метрологічними характеристиками	Наявна	Недоступна
		Використання зразкового лазерного гіроскопа з нормованими метрологічними характеристиками	Наявна	Недоступна
		За допомогою ІВС власної розробки	Потребує розробки	Доступна
2.	Технологія надійної передачі даних та живлення з нерухомої частини на рухому, що обертається	Струмopриймач	Наявна	Доступна
		Надійний багатоканальний USB 2.0 радіоканал	Ненаявна	Недоступна
3.	Керування ІВС та візуалізація даних	Розробка окремого пристрою-контролера для керування та візуалізації	Наявна	Недоступна
		Розробка програмного забезпечення для ПК	Потребує розробки	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: калібрування за допомогою ІВС з застосуванням технології передачі даних з нерухомої частини на рухому через струмоприймач. Для керування ІВС та візуалізації даних необхідно розробити програми для ПК.				

Проаналізувавши таблицю 5.4 можна зробити висновок, що наш проект базується на новій ІВС, в якій інформаційні потоки об'єднуються та передаються з нерухомої частини на рухому через струмоприймач. При

розробці проекту будуть створене ПЗ для ПК з застосуванням існуючих мов програмування – С та С++, а також фреймворку Qt.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

Визначимо ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити його реалізації [28].

Це дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.5).

Таблиця 5.5 – Попередня характеристика ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	6
2	Загальний обсяг продаж, ум.од	500 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Немає
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20%

Отже за попереднім оцінюванням, можна зробити висновок, що ринок є конкурентоспроможним та зростаючим. Серйозних обмежень для входу не має.

Далі визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.6) [28].

Таблиця 5.6 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Визначення коефіцієнтів моделі вихідних сигналів ПКШ у складі ІНС	Виробники ІНС	- необхідна різна точність калібрування;	- забезпечення необхідної точності калібрування;
2.		Користувачі ІНС	- необхідна різна тривалість калібрування;	- зручність користування; - продуктивність калібрування; - консультації, гарантійний ремонт; - Підтримка та оновлення ПЗ від виробника.

Проаналізувавши особливості потенційних клієнтів, можна зробити висновок, що існують деякі відмінностей у поведінці різних цільових груп, але розробка задовольняє усій сукупності наявних вимог різних споживачів.

При застосуванні даної технології існують певні загрози. (таблиця 5.7), які можна поділити на такі категорії: чинники попиту, чинники конкуренції, чинники збуту, економічні чинники, політичні і правові чинники, науково-технічні чинники, соціально-демографічні чинники, соціально-культурні чинники, природні і екологічні чинники, міжнародні чинники [28].

Таблиця 5.7 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Обмежений бюджет на просування продукту	Потенційні клієнти, які можуть бути по всьому світу, не дізнаються про продукт	Залучення зовнішніх інвестицій

2.	Невідомість компанії на ринку	Потенційні клієнти можуть не довіряти новачку на ринку та обирати товари відомих виробників з гарною репутацією	Розробка системи маркетингових заходів, участь у виставках та конференціях
3.	Конкуренція	Поява виробників аналогічної продукції	Створення та захист патенту на промисловий зразок, вдосконалення продукту, встановлення конкурентоспроможних цін
4.	Попит	Падіння попиту через насичення ринку	Модернізація конструкції з додаванням нових, ще не запроваджених конкурентами властивостей
5.	Погіршення економічної ситуації	Зниження купівельної спроможності	Пошук клієнтів на міжнародному ринку

Загрози, що постають перед компанією є типовими для стартапів, для протидії ним компанії необхідно залучити зовнішні інвестиції, працювати над популяризацією себе та створенням гарної репутації, а також вдосконаленням своєї продукції.

Але поряд із колом загроз існують і певні можливості (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Інвестиції	Існування «бізнес-ангелів» та венчурних фондів [29]	Використання цих інвестицій для маркетингових заходів при виході на ринок
2.	Погіршення позицій конкурентів	Клієнти зі зростаючої кількості невеликих компаній, що працюють з ІНС, не купують дороге обладнання конкурентів	Пропонувати наш продукт таким клієнтам
3.	Попит	Зростання ринку ІНС	Відслідковувати появу нових компаній, що працюють з ІНС та пропонувати наш продукт
4.	Збут	Можливість продавати товари в інтернеті через власний сайт або посередників	Придбання доменного імені, розробка сайту, розміщення на ньому каталогу товарів;

			співпраця з посередниками
5.	Міжнародні конференції та виставки	У світі проводиться чимало подій, на яких можна презентувати свої наробки, що сприятиме їх популяризації	Участь у виставках та конференціях
6.	Існуючий ринок	Користувачі можуть описати ринок і найбільш значущі для них характеристики продукту. Як правило, новий продукт добре і швидко працює, покращує або здешевлює процеси або просто задовольняє будь-яке інше вимога споживача. Користувачі, ринок і конкуренти відомі, і конкуренція означає порівняння продукту і його характеристик з іншими [30].	Розробляти стратегію та тактику поведінки на ринку враховуючи цю особливість.

З таблиці 5.8 видно, що існує чимало ринкових можливостей, які можна використати, більшість з них пов'язані з розв'язанням проблем фінансування та популяризації проекту.

У таблиці 5.9 наведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку.

Таблиця 5.9 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1 Тип конкуренції - олігополістична	Однорідну продукцію продають декілька продавців. За цих умов кожен з них здійснює свою власну ринкову стратегію, але при цьому мусить враховувати стратегію і дії конкурентів.	Висока якість продукту та сервісу, конкурентоспроможні ціни
2 За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний	Компанії-конкуренти є у різних країнах світу	Відповідність продукту стандартам та законодавству країн, на ринках яких він буде представлений, англomовна документація та комунікація

3 За галузевою ознакою – внутрішньогалузева	Боротьба між товаровиробниками однієї галузі за вигідніші умови виробництва і реалізації товарів з метою одержання прибутку	Вдосконалення продукту
4 Конкуренція за видами товарів – товарно-видова	Конкуренція між товарами одного виду (ІВС для калібрування)	Створення товару з відмінною від конкурентів конструкцією та характеристиками
5 За характером конкурентних переваг – цінова	Ціна на товар змінюється залежно від точності та діапазонів інших величин характеристик систем	Асиміляція до нових технологій
6 За інтенсивністю – немарочна	Бренди конкурують, але технічні характеристики продуктів мають найбільшу роль	Бути відмінними від конкурентів та використати маркетингові інструменти для популяризації продукту

За наявності олігополії на ринку необхідно продемонструвати клієнтам переваги товару та встановити привабливіші ціни. Важливо розробити ефективну стратегію виходу на вітчизняний та міжнародний ринок, рекламну компанію, та обрати канали збуту.

Далі проведено аналіз конкуренції у галузі за моделлю М. Портера [31]. Його результати наведені у таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Acutronics, Actidyn, Motion Dynamics	Наявність існуючих відомих брендів, товарних знаків; Поява виробників аналогічної	Можуть підвищити ціни на компоненти системи, зняти їх з виробництва або перестати	Купівельна спроможність, обсяг закупівлі	Поява більш зручного чи привабливого товару

		продукції; Зменшення попиту	постачати у країну, де буде вироблятися продукт		
Висновки:	Доволі інтенсивна конкурентна боротьба, основні засоби боротьби – збільшення витрат на рекламу, вдосконален ня продукту	Є можливості виходу на ринок, але є конкуренти та загрози	Постачальни ки не диктують умови на ринку, компоненти системи не є рідкісними або унікальним и, можливе їх придбання у інших постачальни ків або заміна на товари- аналоги	Клієнти диктують усі умови роботи на ринку.	Моніторинг ринку товарів- замінників, вдосконален ня продукту для конкурентос проможност і

За результатами аналізу таблиці 5.10 можна прийти до висновку, що стартапу доведеться конкурувати з відомими на ринку конкурентами. Він відносно не залежить від конкретних постачальників, але повинен задовольняти потреби клієнтів, тому задача формування лояльного ставлення клієнтів є головною.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 5.10, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (таблиця 5.3), вимог споживачів до товару (таблиця 5.6) та факторів маркетингового середовища (таблиці 5.7, 5.8) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Результати аналізу зведені у таблицю 5.11 [28].

Таблиця 5.11 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
Ціна	Нижча ціна на товар, ніж у конкурентів
Спеціалізована система	Поява товару спеціалізованого для калібрування ПКШ, який робить цей процес зручнішим для користувача
Різна комплектація	Якщо у замовника є термокамера, систему можна встановити в неї, просвердливши отвір
Висока продуктивність	Одночасне калібрування до 12 ІНС з 36 ПКШ
Репутація	Якщо стартап буде відомим та асоціюватися виключно з тим, що виготовляє якісну, точну, сучасну продукцію, його продукція буде позитивно сприйнята на ринку
Реклама	Ефективна реклама в
Простота виготовлення	Виготовляється без застосування високотехнологічного обладнання

За визначеними факторами конкурентоспроможності (таблиця 5.11) проведено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (таблиця 5.12).

Таблиця 5.12 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з нашим продуктом						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Ціна	20	+						
Спеціалізована система	18		+					
Різна комплектація	9				+			
Висока продуктивність	20			+				
Репутація	18							+
Простота виготовлення	15		+					

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) [32]) (таблиця 5.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 5.11).

Таблиця 5.13 – SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: ціна, спеціалізована система, різна комплектація, висока продуктивність, репутація, простота виготовлення	Слабкі сторони: нижчі ніж у конкурентів точність, діапазон швидкостей та номінальне навантаження
Можливості: попит, доступність, поширена елементна база	Загрози: невідомість на ринку, конкуренція, падіння попиту, погіршення економічної ситуації.

На основі SWOT-аналізу було розроблено альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. таблицю 5.9) [28].

Визначені альтернативи були проаналізовані з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (таблиця 5.14).

Таблиця 5.14 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Просування бренду, реклама	90%	5 місяців
2.	Залучення інвесторів	80%	3 місяці
3.	Участь у конференціях та виставках	40%	6 місяців

4.	Розширення асортименту продукції	80%	6 місяців
----	----------------------------------	-----	-----------

Після аналізу було обрано альтернативу №1, адже вона має більшу ймовірність отримання ресурсів.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: було проведено опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.15) [28].

Таблиця 5.15 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Промислові клієнти (виробники МЕМС-ІНС)	Висока	Високий	Висока	Середня
Промислові клієнти (користувачі ІНС)	Середня	Середній	Високий	Середня

Як цільову групу було обрано групу 1, так як ці споживачі однозначно мають потребу у калібруванні і розроблена система спрямована на здешевлення, спрощення та підвищення ефективності цього процесу.

За результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано цільову групу, для якої буде запропоновано даний товар, та визначено стратегію охоплення ринку – компанія зосереджується на одному сегменті – вона обирає стратегію концентрованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформовано базову стратегію розвитку (таблиця 5.16).

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
PR, просування бренду	Стратегія спеціалізації	Спеціалізації системи під потреби розробників/виробників ІНС, які мають у своєму складі МЕМС-ПКШ	Передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок. Мета тут полягає в задоволенні потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти. Така стратегія може спиратися як на диференціацію, так і на лідерство по витратах, або і на те, і на інше, але тільки у рамках цільового сегменту.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.17).

Таблиця 5.17 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Забираючи існуючих та пошук нових	Так, за потреби	Стратегія заняття конкурентної ніші (Дана стратегія вибрана тому, що ринок має визнаних лідерів даного класу приладів, але вони не спеціалізовані під

			потреби розробників/виробників МЕМС-ІНС, ринок яких стрімко зростає. Зайнявши цю прибуткову та стабільну нішу та підтримуючи і розвиваючи конкурентні переваги компанії сформує лояльність та прихильність споживачів.
--	--	--	--

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. таблицю 5.6), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (таблиця 5.17) та стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.17) розроблено стратегію позиціонування (таблиця 5.18), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект [28].

Таблиця 5.18 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
Ціна, технічні характеристики системи	Позиціонування на основі специфічних відчутних характеристик	об'єктивна властивість товару (спеціалізація системи під калібрування МЕМС-ПКШ у складі ІНС), за яким він відрізняється від товарів конкурентів	Зручне, швидке, зрозуміле калібрування

Результатом виконання підрозділу стала узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрями роботи стартап-компанії на ринку.

5.5 Розробка маркетингової програми стартап-проекту

Сформовано маркетингову концепцію товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 5.19 підсумовано результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.19 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
Калібрування ПКШ	Система, конструкція та ПЗ якої спеціалізовані під цю задачу	Немає товару з аналогічною спеціалізацією
Простота експлуатації	Зрозуміле ПЗ, яке автоматично надає кінцевий результат	Товари конкурентів розраховані на калібрування різних видів перетворювачів, тому не мають ПЗ для зручного калібрування саме таких ПКШ
Ціна	Низька ціна	Економія грошей для споживача

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання (таблиця 5.20).

Таблиця 5.20 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
1 Товар за задумом	Товар дозволяє виконати температурне калібрування ПКШ. Одночасно може відбуватися калібрування до 36 ПКШ		
2 Товар у реальному	Властивості\характеристики	М\Нм	Вр\Тх\Тл\Е\Ор
	1.Якість	Нм	Тх\Тл\Е\Ор

виконанні	2. Точність	М	Тх
	3. Діапазон швидкостей	М	Тх
	4. Ціна	М	Вр
	5. Зручність використання	Нм	Е, Ор
	6. Тривалість калібрування	М	Тх
	Якість: буде проведено тестування, при виході на міжнародний ринок – стандартизація та сертифікація		
Пакування – пластикова або цупка картонна коробка з ущільнювачем			
	Марка: MGS Equipment, назва товару: ARS-C-100		
Товар із підкріпленням	До продажу: консультація спеціаліста, можливість модифікацій ПЗ під потреби клієнта		
	Після продажу: гарантійне обслуговування, випуск оновлень ПЗ		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: Патент на промисловий зразок			

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (таблиця 21). Аналіз проведено експертним методом [28].

Таблиця 5.21 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар
700 000 – 800 000 грн	1 000 000-2 000 000 грн	15 000 000-20 000 000 грн	375 000 -500 000 грн

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого було прийняте рішення проводити збут власними силами і залучати сторонніх посередників (таблиця 5.22).

Таблиця 5.22 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Покупка однієї або декількох одиниць	Консультації, доставка, налаштування	Канали нульового та одного рівня	Інтернет-магазини, посередники

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.23) [28].

Таблиця 5.23 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Пошук якісної, надійної, ефективної продукції за вигідною ціною	Тематичні журнали, електронна пошта, виставки	Ціна, зручність, швидкість калібрування	Показати переваги продукту	Електронні або друковані матеріали з якісними фотографіями, технічними характеристиками та описом переваг, відео-ролик з описом характеристик та використанням, реклама

Результатом розділу стала ринкова (маркетингова) програма, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого впроваджено проект, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

5.6 Висновки до розділу 5

В даному розділі було проведено аналіз продукту – «Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування перетворювачів кутової швидкості». У проекті є можливість комерціалізації, адже ринок ІНС, для калібрування перетворювачів яких вона створена, стрімко зростає.

Основною потенційною групою клієнтів є розробники та виробники МЕМС-ІНС, для калібрування ПКШ яких на ринку на даний момент не існує спеціалізованих систем, що робить проект конкурентоспроможним. Основні конкурентні переваги: спеціалізація під роботу з ПКШ, нижча ціна, можливості налаштування системи під потреби клієнта.

На ринку наявна олігополістична конкуренція, існує декілька великих фірм-конкурентів з гарною репутацією, тому вихід на нього не буде легким. Компоненти, на основі яких створена система, є у широкому доступі та не стануть причиною залежності від конкретних постачальників. Однак, пошук надійних постачальників та побудова взаємовигідних партнерських відносин з ними є важливим для забезпечення стабільності виробничих процесів.

Для ринкової реалізації проекту доцільно обрати альтернативу ринкової поведінки спрямовану на популяризацію та просування бренду за рахунок реклами. Головними завданням є зробити проект відомим та привабливим для потенційних клієнтів на вітчизняному та світовому ринках.

За стратегію охоплення ринку обрано стратегію спеціалізації, за якої необхідно буде сконцентруватися на потребах розробників та виробників МЕМС-ІНС.

Варто сказати, що подальший розвиток проекту є доцільним, оскільки він знайде свою цільову аудиторію.

Так як система вже розроблена та протестована, наступним кроком має бути створення команди для роботи над розробкою та втіленням ринкових стратегій, оренда приміщень для виробництва, зберігання та офісів, вирішення юридичних питань.

ВИСНОВКИ

1. На основі проведеного ознайомлення з методом калібрування ПКШ та огляду і аналізу існуючих рішень для температурного калібрування ПКШ було зроблено висновок, що у порівнянні з існуючими на ринку стендами розроблювана система буде забезпечувати достатні функціональні можливості для виконання калібрування, але на відміну від розглянутих стендів буде спеціалізованою під калібрування МЕМС-ПКШ.

2. Розроблено структуру ІВС та її ДТЗ, проаналізовані механізми, мікросхеми, інтерфейси та компоненти, з врахуванням особливостей яких необхідно розробляти програмне забезпечення. Вивчено їх документацію та конструкцію.

3. Розроблено ПЗ для ДТЗ ІВС на мові С, яке забезпечує рівномірну кутову швидкість обертання досліджуваних ПКШ. Для налаштування цього ПЗ розроблено програму для ПК з інтерфейсом користувача на мові С++ з використанням фреймворку Qt. Вдосконалено алгоритм програми калібрування ПКШ на основі результатів експериментальних досліджень.

4. Проведено експерименти з дослідження впливу рівномірності обертання на вихідні сигнали ПКШ із застосуванням методів математичної статистики. Запропоновано застосовувати алгоритм ковзаючого середнього для зменшення впливу шуму та низькочастотних коливань, обрано оптимальну тривалість вимірювання.

5. Проведено аналіз продукту – «Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування перетворювачів кутової швидкості» у якості стартап-проекту. У проекту є можливість комерціалізації, адже ринок ІНС, для калібрування перетворювачів вона створена, стрімко зростає.

5. Практичні результати магістерської дисертації впроваджено у діяльність компанії ТОВ «Гіротех», де використовуються для оптимізації процесу калібрування ПКШ, що підтверджує теоретичну та практичну цінність розробки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие. – Кировоград: ПОЛИМЕД – Сервис, 2011. – 172 с.
2. Single-Axis Rate and Position Tables // – Режим доступу: <http://www.acutronic.com/ch/products/1-axis-motion-simulators.html> – Дата доступу: 15.12.19 – Single-Axis Rate and Position Tables.
3. Rate and Position Tables simex®ONE // – Режим доступу: http://www.acutronic.com/uploads/tx_AcutronicProducts/Datasheet-1-Axis-Rate-Table-simexONE_01.pdf – Дата доступу: 15.12.19 – Datasheet-1-Axis-Rate-Table-simexONE_01.pdf.
4. 1-осевой стенд модели simex®ONE Acutronic (Швейцария) // – Режим доступу: <http://www.emtlt.com/catalog/2/63/72/> – Дата доступу: 15.12.19 – 1-осевой стенд модели simex®ONE Acutronic (Швейцария).
5. ACUTROL® 3000e Controller // – Режим доступу: http://www.acutronic.com/fileadmin/cms_files/AUS_DS/Datasheet-Digital-Motion-Controller-ACUTROL3000e-AUS.pdf – Дата доступу: 15.12.19 – Datasheet-Digital-Motion-Controller-ACUTROL3000.
6. Одноосевые поворотные столы // – Режим доступу: https://blms.ru/odnoosevye_pov_stolu – Дата доступу: 15.12.19 – Одноосевые поворотные столы.
7. Системы управления имитаторов движения // – Режим доступу: https://blms.ru/sys_upr_imitators – Дата доступу: 15.12.19 – Системы управления имитаторов движения.
8. Одноосевые поворотные столы // – Режим доступу: <https://sovtest-ate.com/equipment/odnoosevye-povorotnye-stoly/> – Дата доступу: 15.12.19 – Одноосевые поворотные столы.
9. Скрипковська М. Г. Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості / М.Г. Скрипковська, М.В.

Добролюбова // «ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ» збірник праць, 10 – 11 грудня 2019 р., м. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 525-528.

10. TMS320F28335 // – Режим доступу: <http://www.ti.com/product/TMS320F28335> – Дата доступу: 15.12.19 – TMS320F28335 Delfino™ 32-bit MCU with 150 MIPS, FPU, 512 KB Flash, EMIF, 12b ADC | TI.com.

11. Цифровые сигнальные контроллеры с плавающей точкой // – Режим доступу: <https://www.compel.ru/lib/54765> – Дата доступу: 15.12.19 – Цифровые сигнальные контроллеры с плавающей точкой.

12. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Capture (eCAP) Module Reference Guide // – Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ug/sprufg4a/sprufg4a.pdf> – Дата доступу: 14.12.19 – TMS320x2833x, 2823x Enhanced Capture [ECAP] Module.

13. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module Module Reference Guide // – Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ug/sprug05a/sprug05a.pdf> – Дата доступу: 14.10.19 – TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse.

14. UART // – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/UART> – Дата доступу: 15.12.19 – UART.

15. USB // – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/USB> – Дата доступу: 15.12.19 – USB.

16. USB_hub // – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/USB_hub – Дата доступу: 15.12.19 – USB_hub.

17. Data Sheet AD5546/AD5556 // – Режим доступу: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5546_5556.pdf – Дата доступу: 15.12.19 – AD5546/AD5556 (Rev. D).

18. ДБМ 105-0,6-0,5-3 // – Режим доступу: http://mashap.maverick.ru/MenuVert/StatorGlad/105_0.6-0.5_3.html – Дата доступу: 15.12.19 – ДБМ 105-0,6-0,5-3.
19. E40H8-3600-3-N-5 Autonics // – Режим доступу: <https://www.compel.ru/infosheet/AUTONICS/E40H8-3600-3-N-5> – Дата доступу: 15.12.19 – E40H8-3600-3-N-5 / Autonics.
20. Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE) // – Режим доступу: <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO> – Дата доступу: 15.12.19 – Code Composer Studio (CCS) Integrated Development.
21. Папушин Ю.Л., Білецький В.С. Основи автоматизації гірничого виробництва. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2007. – 168 с.
22. Qt // – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Qt> – Дата доступу: 15.12.19 – Qt.
23. Майстренко В.М., Морозова І.В., Осадчий В.П., Порєв В.А. Основи теорії засобів вимірювання: Монографія./Під заг. ред. Майстренка В.М.— Хмельницький, 2010 — 493 с.
24. Рухоме середнє // – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Рухоме_середнє – Дата доступу: 15.12.19 – Рухоме_середнє.
25. Перетворення Фур'є // – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F_%D0%A4%D1%83%D1%80%27%D1%94 – Дата доступу: 15.12.19 – Перетворення Фур'є.
26. Inertial Navigation System (INS) Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2019-2024 // – Режим доступу: <https://www.imarcgroup.com/inertial-navigation-system-market> – Дата доступу: 15.12.19 – Inertial Navigation System (INS) Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2019-2024.

27. Inertial Navigation System Market: Segmentation By Product Type (Navigation, Tactical, Commercial, Marine); By Technology (MEMS, Fiber Optic Gyro, Ring Laser Gyro, Mechanical, Vibrating Gyro); By Application (Naval, Airborne, Land, Commercial) – Global Demand Analysis & Opportunity Outlook 2027 // – Режим доступу: <https://www.researchnester.com/reports/global-inertial-navigation-system-market/801> – Дата доступу: 15.12.19 – Inertial Navigation System: Global Industry Demand.

28. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с. URL: http://kaf-pe.kpi.ua/wp-content/uploads/2015/04/roz_startap_proektiv_met_vk.pdf

29. Экланд С. Ангелы, драконы и стервятники : как привлечь правильных инвесторов в свой стартап и сохранить бизнес / С. Экланд ; пер. с англ. О. Терентьевой. – Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2011. – 275 с.

30. Бланк, С. Стартап. Настольная книга основателя / С. Бланк, Б. Дорф ; пер. с англ. Т. Гутман, И. Окунькова, Е. Бакушева. – 2-е изд. – Москва : Альпина Паблишер, 2014. – 614 с.

31. Michael E. Porter. «The Five Competitive Forces that Shape Strategy», Harvard Business Review, January, 2008, p.86.

32. Филипп Котлер, Роланд Бергер, Нильс Бикхофф. Стратегический менеджмент по Котлеру. Лучшие приемы и методы = The Quintessence of Strategic Management: What You Really Need to Know to Survive in Business. — М.: Альпина Паблишер, 2012. — 144 с.

ДОДАТОК А
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Вих.№
від 10 грудня 2019 р.

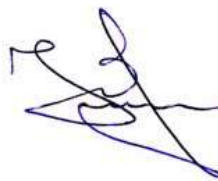
Кафедрі автоматизації
експериментальних досліджень
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОВІДКА

про впровадження у діяльність ТОВ «Гіротех» результатів магістерської дисертації
на здобуття ступеня магістра
Скрипковської Марії Геннадіївни

Повідомляємо, що результати, викладені у магістерській дисертації Скрипковської Марії Геннадіївни «Інформаційно-вимірювальна система температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості», використовуються нами для оптимізації процесу калібрування перетворювачів кутової швидкості. Розробка має високу теоретичну і практичну цінність, дозволяє підвищити точність і продуктивність калібрування.

Директор
ТОВ «Гіротех»



Чех Ю.В.

ДОДАТОК Б
ПУБЛІКАЦІЇ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ І АВТОМАТИКИ

**«ВИМІРЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА В
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ (ВКДТС-2019)»**

**П'ЯТА МІЖНАРОДНА НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
29 – 31 жовтня 2019 р.**

Збірник тез доповідей

**MEASUREMENT, CONTROL AND DIAGNOSIS
IN TECHNICAL SYSTEMS**

ВНТУ
ВІННИЦЯ
2019

ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ МІКРОКЛІМАТУ У ВИРОБНИЧОМУ ПРИМІЩЕННІ	
O.A. Poplavskyi, S.V. Pavlov, V.B. Vassilenko, A.A. Poplavska INTELLECTUAL SYSTEMS FOR SUPPORTING DECISION-MAKING OF SPOT AND FUTURES TRADING EXCHANGE	99
М.Г. Скрипковська, М.В. Добролюбова ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ДЛЯ СТЕНДУ ТЕМПЕРАТУРНОГО КАЛІБРУВАННЯ ГРОСКОПІЧНИХ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ	100
Т.Г. Бойко, М.В. Руда ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ В ОЦІНЦІ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК	102
П.І. Кулаков, О.О. Плешко, А.П. Кулакова ОГЛЯД ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО УДОЮ	104
К.Ф. Боряк, Н.О. Перетяка, В.В. Грицанова ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ СУБЛІМАЦІЇ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ ЗА ПАРАМЕТРОМ ТИСКУ В ЛЮФІЛІЗАТОРІ	106
О.М. Возняк, А.С. Клезь АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ РІВНЯ РІДИНИ	108
В.М. Войцицький ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ СУШІННЯ МОЛОКА	110
Т.В. Король ПРИЛАД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КУТА НАХИЛУ ОБ'ЄКТА	111
М.І. Каращенко ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ МІКРОПЕРЕМІЩЕННЯ З СМІСНИМ ПЕРВИННИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ	112
В.Ю. Кучерук, В.С. Маньковська, О.О. Данілов, Т.В. Бойко ІНДУКТИВНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НА ОСНОВІ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНО-ХАОТИЧНИХ КОЛИВАНЬ	113
І.А. Дудатьєв, В.А. Барабаш ПОЛІКРИСТАЛІЧНИЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРИЧНУ З ПОКРАЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ПЕРЕТВОРЕННЯ СВІТЛА	115
І.А. Дудатьєв, В.В. Горбатюк ЗАСІБ КОНТРОЛЮ ТА ГЕНЕРАЦІЇ ОЗОНУ У РЕГУЛЬОВАНИХ ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ	117
І.А. Дудатьєв, М. Кузнецов ПЕРЕТВОРЮВАЧ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІТРОВОГО ПОТОКУ У ЕЛЕКТРИЧНУ З ПОКРАЩЕНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ БЕЦА	118
О.М. Васілевський, Д.М. Компанець КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ СИСТЕМОЮ АВТОМАТИЗОВАНОГО НАЛИВУ НАФТОПРОДУКТІВ НА НАФТОБАЗАХ	121
Santos P.H.C., Vassilenko V., Moura P.C., Conduto C., Fernandes J.M., Bonifácio P. INSTRUMENTATION FOR DIFFERENTIATION OF EXHALED AIR	122
V. Vassilenko, A. Poplavska, S. Pavlov, P. Kolisnyk, O. Poplavskyi, S. Kolisnyk, Y. Vitrova AUTOMATED FEATURES ANALYSIS OF PATIENTS WITH SPINAL DISEASES USING MEDICAL THERMAL IMAGES	124
Bonifacio P., Marques G., Cardoso F., Casal, D., Vassilenko V. ELECTROMYOGRAPHY SIGNAL ANALYSIS FOR TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF DEVICE ASSISTED REHABILITATION OF UPPER ARM	126
Є. Чепусенко, В. Сахаський МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ БУРОВОЇ ГОЛОВКИ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НАПРАВЛЕНОМУ БУРІННІ	128

М.Г. Скрипковська, студентка; М.В. Добролюбова, к.т.н., доцент
ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТИ
ОБЕРТАННЯ ДЛЯ СТЕНДУ ТЕМПЕРАТУРНОГО КАЛІБРУВАННЯ
ГІРОСКОПІЧНИХ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КУТОВОЇ
ШВИДКОСТІ

Ключові слова: стенд, калібрування, регулятор, гіроскоп, кутова швидкість, термокамера, мікроконтролер

Розробка стендів для випробування об'єктів в умовах впливу штучно створених зовнішніх факторів необхідно в разі забезпечення обладнанням для тестування продукції виробників різноманітних перетворювачів, приладів або систем. Зокрема, такі випробування проводяться при калібруванні мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості (ПКШ) (мікромеханічних гіроскопів (ММГ)), які можуть використовуватися у системах навігації, орієнтації та керування автомобілів, безпілотних літальних апаратів, системах стабілізації платформ, камер та у різноманітних гаджетах.

Калібрування гіроскопів за нормальних умов розбивається на два етапи, на першому з яких задається кутова швидкість обертання, а на другому – нерухомий модуль (з гіроскопами) встановлюється у різних положення відносно вектору прискорення сили тяжіння g [1]. Викладений далі матеріал стосується створення програмного забезпечення для стенду температурного калібрування (СТК), на якому здійснюють перший етап при різних температурах. На даному етапі визначаються коефіцієнти матриці масштабних коефіцієнтів та перехресних зв'язків моделі вихідних сигналів шляхом задання ряду значень кутових швидкостей обертання. Для цього інерційний вимірювальний модуль (ІВМ), у складі якого є ПКШ, або самі ПКШ, встановлюють на спеціальний поворотний стіл, вісь якого повинна бути виставлена вертикально. При цьому температура зовнішнього середовища ПКШ задається за допомогою термокамери, у якій розміщений поворотний стіл.

Структурна схема СТК наведена на рисунку 1.

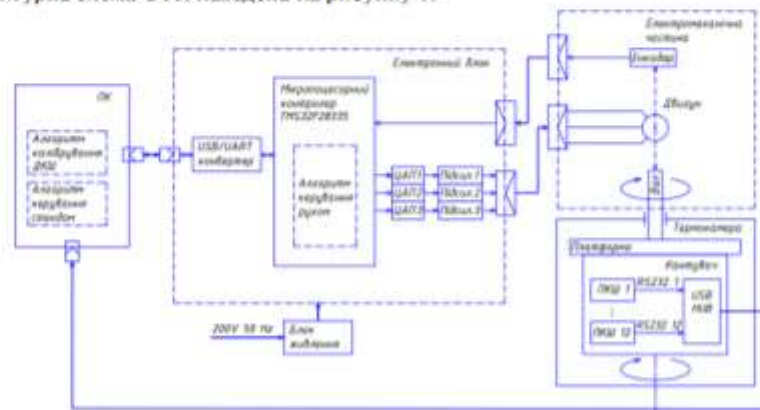


Рис.1 –Структурна схема СТК

СТК складається з електронного блоку, електромеханічної частини, термокамери та персонального комп'ютера (ПК). За допомогою програмного забезпечення (ПЗ) на ПК можна керувати стендом: задавати кутову швидкість (частоту обертання), починати та зупиняти рух і проводити калібрування ПКШ. Трифазний безколекторний серводвигун обертає закріплену на його валу платформу зі встановленим на неї калібрувачем з ММГ. Програма мікроконтролера (МК) TMS32F28335 керує цим двигуном. Вал обертається із заданою постійною кутовою швидкістю або здійснює перехід з однієї швидкості на іншу. Поворот валу контролюється за допомогою з'єднаного з валом інкрементального енкадера. USB hub об'єднує інформацію з досліджуваних ММГ та передає на ПК. Робота регулятора швидкості обертання синхронізована по внутрішньому таймеру, що виробляє тактові імпульси з частотою 2 кГц та викликає переривання. Під час обробки переривання виконується програма, блок-схема якої зображена на рисунку 2.



Рис. 2 – Програма обробки переривання таймеру

Вбудований в МК модуль eCAP [2] підраховує такти тактової частоти процесора (135 МГц) між імпульсами енкадера, що дозволяє визначити миттєву частоту обертання. Різниця миттєвої та заданої частоти надходить до алгоритму цифрового пропорційно-інтегрального регулятора швидкості. За допомогою вбудованого в МК модуля eQEP [3] зчитуються коди поточного кутового положення валу. Розраховуються добутки вихідного коду регулятора на зсунуті по фазі на 120° синусоїди – функції коду поточного кутового положення валу. Ці добутки подаються на ЦАП1, ЦАП2, ЦАП3, їх вихідні напруги утворюють трифазну систему напруг, які надходять на відповідні підсилювачі потужності, а з їх виходів – по кабелю на трифазні обмотки двигуна. В основному тілі програми виконується прийом заданої швидкості, команд початку та зупинки роботи, а також видача на ПК даних про середню частоту обертання за оберт.

Отже, розроблене ПЗ забезпечує роботу стенду у відповідності з його технічним завданням, що дозволяє використовувати стенд для калібрування ПКШ.

1. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие. – Кировоград: ПОЛИМЕД – Сервис, 2011. – 172 с.

2. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Capture (eCAP) Module Reference Guide // – Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ug/sprufg4a/sprufg4a.pdf> – Дата доступу: 14.10.19 – TMS320x2833x, 2823x Enhanced Capture [eCAP] Module .

3. TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module Reference Guide // – Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ug/sprug05a/sprug05a.pdf> – Дата доступу: 14.10.19 – TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ПРИЛАДОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕНЕДЖМЕНТУ І МАРКЕТИНГУ



Інженерна Компанія
ТЕХНОПОЛІС



*XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів,
аспірантів та молодих вчених*

"ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ"

10-11 грудня 2019 р.
м. Київ, Україна

Збірник праць конференції



КИЇВ 2019

XV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «ЕФЕКТИВНІСТЬ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ», 10-11 грудня 2019 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

М.С. Скрипковська, студентка гр. ВА-81мп, к.т.н., доц. Добролюбова М.В. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ТЕМПЕРАТУРНОГО КАЛІБРУВАННЯ ГРОСКОПІЧНИХ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ.....	525
В.О. Смірнов, студент гр. ВА-81мп, к.т.н., доц. Богомазов С.А. СИСТЕМА ЗБОРУ ДАНИХ НА ОСНОВІ СТИСНЕНИХ ВИМІРЮВАНЬ	529
О.В. Токаренко, студент гр. ПА-91мп, к.т.н., доц. Богомазов С.А. СИСТЕМА ЗБОРУ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ JAVA- ФРЕЙМВОРКІВ	532
Є.Л. Шилін, студент гр. ВА-81МП, к.т.н. доцент Стаценко О.В. ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	535
Ю.В. Штефура, аспірант, д.т.н., проф. Хімічева Г.І. ПРОГНОЗУВАННЯ ГЛИБИНИ ТЕРМІЧНИХ УРАЖЕНЬ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	539
О. І. Яценко, студентка гр. ВА-81мп ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ПОВІРКИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЕМПЕРАТУРИ.....	543

УДК 629.7

*М.С. Скриповська, студентка гр. ВА-81мп, к.т.н., доц. Добролюбова М.В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського*

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ТЕМПЕРАТУРНОГО КАЛІБРУВАННЯ ГІРОСКОПІЧНИХ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

Анотація. В статті представлені матеріали щодо розробки ІВС для температурного калібрування перетворювачів кутової швидкості.

Ключові слова: калібрування, регулятор, гіроскоп, кутова швидкість, термокамера, мікроконтролер

ВСТУП

У наш час стрімко зростає ринок інерціальних навігаційних систем (ІНС), який у 2018 році досяг 10.1 мільярда доларів США [1]. Ці системи використовуються для визначення координат та швидкості руху таких об'єктів як автомобілі, літальні апарати та різноманітні гаджети. Використання первинних перетворювачів, виготовлених за технологіями мікроелектромеханічних систем (МЕМС), дозволяє створювати легкі, економічно вигідні та компактні ІНС. Мікромеханічні (МЕМС) гіроскопи (ММГ) використовуються у таких ІНС у якості первинних вимірювальних перетворювачів кутової швидкості (ПКШ). Однією із найважливіших задач при створенні ІНС є калібрування її перетворювачів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Мета статті – розробити структуру інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для температурного калібрування коефіцієнтів перетворення та перехресного зв'язку гіроскопічних мікромеханічних ПКШ, а також алгоритми керування її допоміжними технічними засобами.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

ПКШ калібруються вже будучи встановленими у ІНС. Коефіцієнти матриці коефіцієнтів перетворення та перехресного зв'язку моделі вихідних сигналів ПКШ визначаються шляхом задання ряду значень кутової швидкості [2]. Для цього ІНС встановлюють на спеціальний поворотний стіл, вісь обертання якого має бути виставлена строго вертикально. Для компенсації температурних похибок параметрів моделі вихідних сигналів ПКШ здійснюється температурне калібрування, при цьому для визначення поточної температури використовують вбудовані вимірювальні перетворювачі температури (ВПТ) кожного з гіроскопів. Загальна структурна схема ІВС зображена на рисунку 1. На рисунку 2 зображено вимірювальні канали ІВС, які фізично розташовані на рухомій частині. Рухома частина – закріплена на валу платформа, до якої приєднується кантувач з ІНС та інтерфейсний блок.

Розроблена ІВС використовується для отримання, перетворення та обробки вимірювальної інформації від ПКШ. Електронний блок, електромеханічна частина та платформа, обертанням якої вони керують, а також термокамера є допоміжними технічними засобами ІВС.

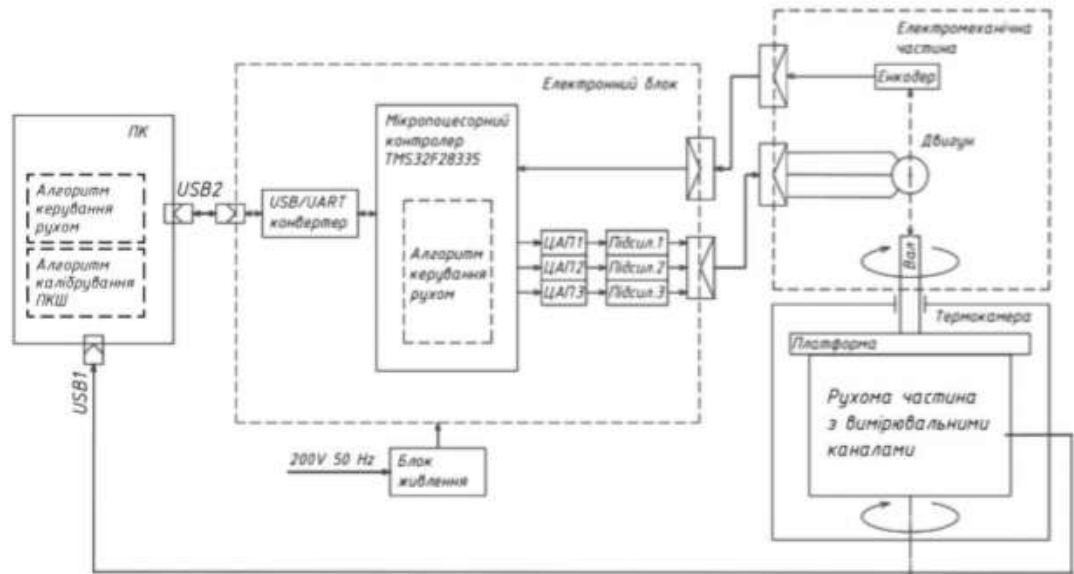


Рисунок 1. Структурна схема ІВС

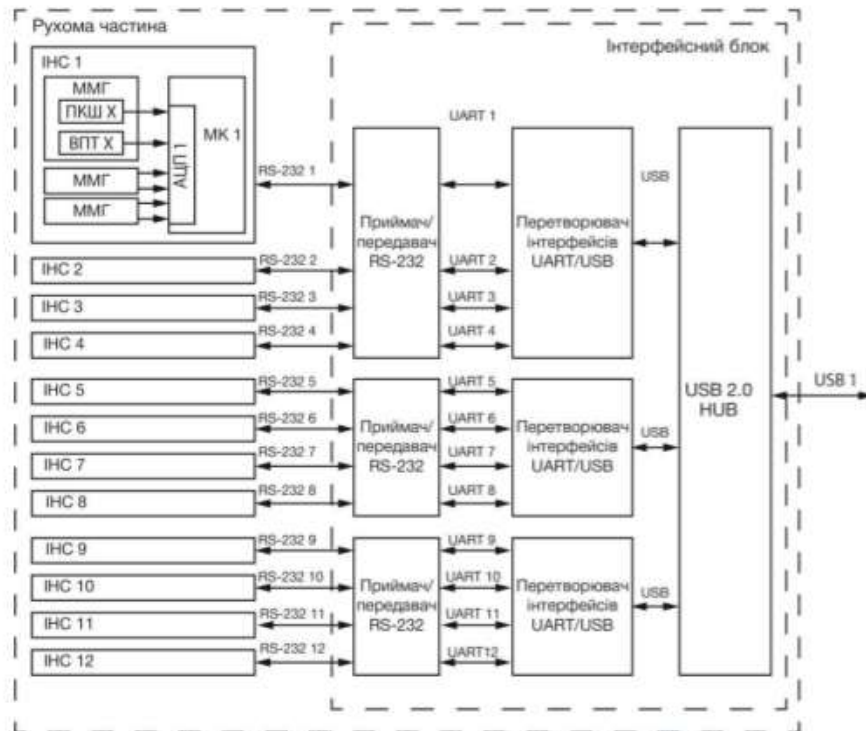


Рисунок 2. Структурна рухомої частини ІВС

У кожній ІНС є три ММГ з вбудованими ВПТ. Чутливі осі ММГ взаємно перпендикулярні. Напруга, пропорційна виміряній кутовій швидкості, поступає на АЦП мікроконтролера ІНС разом з напругою, пропорційною температурі ВПТ.

У кантувач може бути встановлено до 12 ІНС, таким чином під час процедури калібрування може відбуватися калібрування 36 ПКШ. Вихідні дані

мікроконтролера ІНС, які містять коди, що відповідають вимірянній кутовій швидкості, передаються за допомогою інтерфейсу RS-232.

«Інтерфейсний блок» перетворює дані ІНС з 12 інтерфейсів RS-232 на дані, що передаються по одному кабелю інтерфейсу USB на ПК, де формують 12 віртуальних COM-портів. Мікросхеми приймача/передавача RS-232 призначені для перетворення чотирьох сигналів RS-232 у сигнали TTL UART, з якими працюють мікросхеми-перетворювачі інтерфейсів UART/USB. USB Hub об'єднує дані в один інформаційний потік. На ПК встановлені драйвери, що дозволяють «бачити» 12 віртуальних COM-портів, на кожний з них надходить інформація, ідентична надісланій з відповідних ІНС. Таке об'єднання каналів у один USB-канал дозволяє економно передати сигнали з рухомої частини через один струмоприймач на нерухому частину та підключитися до одного порту персонального комп'ютера (ПК) USB 1 версії 2.0. Розроблене програмне забезпечення (ПЗ) реалізує візуалізацію та зберігання даних ПКШ і ВПТ та алгоритм калібрування ПКШ.

Оскільки під час калібрування ПКШ повинні обертатися з постійною кутовою швидкістю, було розроблено систему допоміжних технічних засобів, що забезпечують рух рухомої частини. За допомогою розробленого ПЗ ПК експериментатор може керувати стендом: задавати швидкість обертання, починати та зупиняти рух. Розміщення рухомого блоку у термокамері дозволяє здійснювати калібрування на різних температурах для визначення коефіцієнтів температурної чутливості.

Команди з ПК через USB 2 надходять до електронного блоку. В електронному блоці USB/RS232 конвертер передає команду з ПК на вхід послідовного порту мікропроцесорного контролера (МК) TMS32F28335 фірми Texas Instruments [4]. Програма МК керує трифазним безколекторним сервомотором, який обертає закріплену на його валу платформу. Робота регулятора швидкості обертання здійснюється у перериваннях внутрішнього таймера МК, блок-схема переривань зображена на рисунку 3. Поворот валу контролюється за допомогою з'єднаного з валом інкрементального енкодера [3]. Вбудований у МК модуль eQEP [5] перетворює імпульси, що надходять від енкодера, в код поточного кутового положення, а модуль eCAP [6] підраховує такти тактової частоти процесора між цими імпульсами для визначення миттєвої частоти обертання. Програма визначає різницю між визначеною за допомогою енкодера та заданою кутовими швидкостями, цю різницю використовує алгоритм цифрового пропорційно-інтегрального регулятора швидкості. Добутки вихідного коду регулятора на зсунуті по фазі на 120° синусоїди подаються на цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) – ЦАП1, ЦАП2, ЦАП3. Вихідні напруги ЦАП утворюють трифазну систему напруг, які надходять на відповідні підсилювачі потужності, а з їх виходів – по кабелю на трифазні обмотки двигуна.

Отже, розроблена ІВС дозволить забезпечити виробників та користувачів на стрімко зростаючому ринку ІНС обладнанням для їх калібрування.

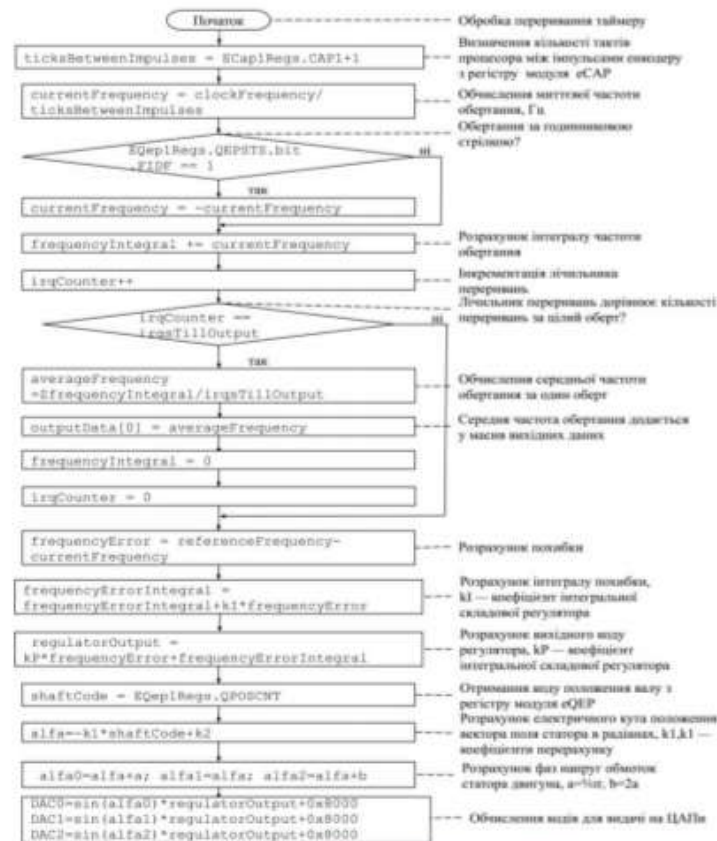


Рисунок 3. Блок-схема програми обробки переривання таймеру

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Inertial Navigation System (INS) Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2019-2024. — Режим доступу: https://www.imaregroup.com/inertial-navigation-system-market_ — 23.11.2019 р.
- [2] Мелешко В.В., Бесплатформенные инерциальные навигационные системы. Учебное пособие / В.В. Мелешко, О.И. Нестеренко. — Кировоград: ПОЛИМЕД – Сервис, 2011. — 172 с.
- [3] Скрипковська М. Г. Програмне забезпечення системи стабілізації частоти обертання для стенду температурного калібрування гіроскопічних мікромеханічних перетворювачів кутової швидкості / М.Г. Скрипковська, М.В. Добролюбова // «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2019): збірник тез доповідей (ел.), 29 – 31 жовтня 2019 р., м. Вінниця: ВНТУ, 2019. — С. 100-101.
- [4] TMS320F2833x, TMS320F2823x Digital Signal Controllers (DSCs) // — Режим доступу: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28234.pdf> — 14.10.2019
- [5] TMS320x2833x, 2823x Enhanced Capture (eCAP) Module Reference Guide // — Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ug/sprug4a/sprug4a.pdf> — 23.11.2019
- [6] TMS320x2833x, 2823x Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Module Reference Guide // — Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ug/sprug05a/sprug05a.pdf> — 23.11.2019

Наук. Керівник — к. т. н., доц. Добролюбова М.В.